مبادئ الرادار

مؤتمن ميرغني دفع الله

أكاديمية كرري للتقانة

الطبعة الأولى 2006 م

حقوق النشر والنسخ محفوظة لأكاديمية كرري للتقانة
السودان ص.ب. 12304 الخرطوم
لا يسمح نسخ أي جزء من هذا الكتاب أو نشره بأي شكل إلا بإذن
صريح من مؤلفه عبر البريد الإلكتروني mtnmir@gmail.com

طباعة جي تاون – الخرطوم

المحتويات

تمهيد 7

الاختصارات 11

الرموز 13

1- مقدمة

1-1 فكرة عمل الرادار 15

1-2 الرادار النبضي 17

1-3 ترددات الرادار 19

1-4 تطبيقات وأنواع الرادار 18

1-5 أمثلة لأنظمة رادارية 21

أسئلة وتمارين 27

2- معادلة الرادار

2-1 المدى الأقصى للرادار 29

2-2 مدلولات معادلة الرادار 31

2-3 المقطع الراداري للهدف 32

2-4 طيف الإشارة الرادارية 34

2-5 أقل إشارة مكتشفة 36

2-6 القدرة المرسلة 38

أسئلة وتمارين 41

3- تركيب الرادار

3-1 المخطط الصندوقي 43

3-2 هوائي الرادار 45

3 3 مرسل الرادار 47
3 4 مستقبل الرادار 48
3 5 مبين الرادار 51
أسئلة وتمارين 57

4- معالجة الإشارات الرادارية

4 1 مقدمة 59
4 2 ترشيح الإشارات 60
4 3 الترشيح التوافقي 62
4 4 الرابط كمرشح متوافق 65
4 5 التكبير اللوغريتمي والتفاضل 66
4 6 التحكم الزمني في التكبير 68
4 7 تكامل نبضات الرادار 70
4 8 ترشيح النبضات المتزامن 72
4 9 كشف الإشارات 74
4 10 تثبيت معدل الإنذارات الكاذبة 75
أسئلة وتمارين 77

5- تمييز الأهداف المتحركة

5-1 ظاهرة دوبلر 79
5-2 تمييز الأهداف المتحركة 81
5-3 مرشح الأهداف المتحركة 83
5-4 الاستجابة الترددية لمرشح MTI 84
5-5 السرعات العمياء 86
5-6 زوايا الطور العمياء 87
5-7 السرعات التماسية 88

أسئلة وتمارين 89

6- معالجة البيانات الرادارية

6-1 مقدمة 91

6-2 قياس الزاوية و المدى 92

6-3 الكشف الآلي 93

6-4 التتبع أثناء البحث 96

6-5 تنعيم المسارات 98

6-6 متتبع ألفا وبيتا 100

6-7 ترشيح البقع الكاذبة 102

6-8 تشكيل البيانات المرسلة 103

6-9 التتبع المتعدِّد 105

أسئلة وتمارين 107

7- مرسلات الرادار

7-1 خواص المرسل 109

7-2 الصمامات الفراغية 111

7-3 الصمام الثلاثي 114

7-4 الماغنترون 117

7-5 تحليل الماغنترون 120

7-6 الكلايسترون 121

7-7 صمام الموجة الراحلة 123

7-8 المعدِّلات النبضية 124

أسئلة وتمارين 130

8- مستقبلات الرادار

8 1 خواص المستقبل ....,,...................... 133
8 2 المزدوِج ....,,,,,.............................. 134
8 3 حماية المستقبل 138
8 4 المحدِّدات 139
8 5 المذبذبات المحلية 141
8 6 المازجات والكاشفات 145
8 7 دائرة المستقبل ....,.......................... 147
أسئلة وتمارين 149

9- الرادار الثانوي

9-1 نظام التعارف 151
9-2 نظام الرادار الثانوي ....,,..................... 152
9-3 نظام المُجيب 155
9-4 صيَغ الاستفسار ....,,,....................... 157
9-5 إشارة الإجابة 159
9-6 إلغاء الإشعاع الجانبي ....,..................... 160
أسئلة وتمارين 162

المراجع 165

تمهيد

بسم الله الرحمن الرحيم

الحمد لله وحده والصلاة والسلام على من لا نبيَّ بعده . انطلاقاً من أهمية الرادار في المجالات الهندسية المدنية والعسكرية منها ، أُقدم كتابي هذا كأول كتاب من نوعه باللغة العربية في نظرية ومبادئ أنظمة الرادار بالسودان راجياً من الله العزيز أن يكون أحد دعامات المعرفة والتقانة الحديثة بالبلاد .

هذا وقد بدأت التفكير في كتابة الكتاب بعد أن قمت بتدريس بعض المواد المرتبطة بأنظمة الرادار خلال الثماني سنوات الماضية بكلٍّ من كلية الهندسة والكلية الفنية بأكاديمية كرري للتقانة وكلية الهندسة بجامعة السودان وإشرافي على بعض الأطروحات المقدمة من الطلاب . فقد لمست الحاجة الماسة من جانب الطلاب لوجود مرجع شامل ومبسط باللغة العربية يقود الطالب إلى فهم أسس ومبادئ الرادار .

كما لمست ذلك أيضاً من خلال تعاوني مع مهندسي وفنيِّ الرادار في كل من الدفاع الجوّي بالقوات المسلحة والطيران المدني والتصنيع الحربي ، حيث أدركت مدى احتياج المُقدِم على العمل بالرادار إلى جرعة نظرية أوّلية كافية قبل أن يبدأ مزاولة عمله بالتشغيل أو الصيانة . نفس الأمر لا شك ينطبق على كثير من القطاعات الأخرى والتي تستخدم الرادار في مجالات الاستطلاع والملاحة والتوجيه وشتى مجالات هندسة وعلوم الطيران والبحرية . ولا يخفى على أحد الدور الكبير لتلقي العلوم باللغة العربية اللغة الأمّ والذي يزيد من معدل التحصيل وينمي المقدرات ويمهِّد للتطور التقني المنشود .

اعتمدت كثيراً في مادة هذا الكتاب على ملخصات المواد التي قمت بتدريسها وعلى الأطروحة التي قدمتها لنيل درجة الماجستير بجامعة الخرطوم إضافة إلى عدد من المراجع المختلفة في مجال الرادار . كما حاولت استصحاب كثير من المعرفة والخبرة التي اكتسبتها بعون الله خلال فترات عملي مع الأخوة في القوات المسلحة والطيران

المدني حيث لم يبخل عليّ الأخوة بما لديهم من معلومات ومصطلحات فنيّة أفادتني في ترجمة كثير من المصطلحات المستخدمة في الرادار.

يحتوي الكتاب على تسعة أبواب تشتمل إلى جانب المادة المراد شرحها على بعض الأسئلة والتمارين المفيدة . يعتبر أول باب مقدمة أو مدخل إلى الرادار يتمّ فيه التطرق إلى فكرة عمل الرادار وخواصه العامة مع عرض مختصر لبعض أنواعه وتطبيقاته مصحوبة ببعض الصور للتعريف ببعض الأنظمة المطبّقة في الواقع . بينما يركز الباب الثاني على التحليل الرياضي لخواص الرادار العامة ممثلة في المدى الأقصى والعوامل المؤثرة به سواءً المتعلقة بنظام الرادار أو المحيطة به .

ينتقل الباب الثالث للتطرق لنظام الرادار من حيث التركيب العام وشرح الوحدات المكونة للنظام ووظائفها دون التعمق في تركيب الدوائر الإلكترونية . يركز البابان الرابع والخامس على طرائق معالجة الإشارة الرادارية المتبعة لتحسين أداء النظام وظيفياً من حيث رفع معدل كشف الأهداف وتقليل آثار العوامل السالبة المحيطة به في حين يركز الباب السادس على استخدام التقنيات الرقمية الحديثة في معالجة بيانات الرادار .

نجد أنّ البابين السابع والثامن يغوصان في بعض تفاصيل الدوائر الإلكترونية لنظامَي الإرسال والاستقبال بالرادار والتقنيات المختلفة المستخدمة في بنائهما . أمّا الباب التاسع والأخير فهو يتعلق بشرح مبدأ عمل أنظمة التعارف العسكرية والرادار الثانوي المدني والتي أحسست بضرورة التطرق إليها لقلة المعلومات المتوفرة عنها وللتطور المطرد الذي تشهده .

أود أن أشكر بعد الله سبحانه كل من ساهم في هذا الكتاب بصورة مباشرة أو غير مباشرة وأخصّ بالشكر الزملاء بأكاديمية كرري للتقانة وبالتصنيع الحربي والقوات المسلحة والطيران المدني . أجزل الشكر موصول إلى كل من أساتذتي الأجلاء أ.د. محمد علي حمد عباس أستاذ الاتصالات بجامعة الخرطوم ، د. الأمين الحسين عميد كلية الهندسة بأكاديمية كرري للتقانة ، د. عبد الرحيم محمد حمد ساتي رئيس قسم

الهندسة الكهربائية والحاسوب بكلية الهندسة بأكاديمية كرري للتقانة وذلك لاهتمامهم البالغ بهذا الكتاب حتى يرى النور . شكري العميق لزميلي العزيز أحمد عوض أحمد بابكر أستاذ الرادار بكلية الهندسة بأكاديمية كرري للتقانة للجهد الكبير الذي قام به في مراجعة هذا الكتاب وعلى تعليقاته النيّرة . كما أشكر تلميذي النجيب محمد بابكر الجيلي الذي قام بمراجعة شاملة للكتاب .

كذلك لا يفوتني شكر أفراد أسرتي الصغيرة لما وفّروا لي من وقت وعناية لإنجاز هذا العمل الذي نسأل الله أن ينفع به البلاد والعباد . وأخيراً أرجو من كل من قرأ هذا الكتاب أن يدعو لنا الله أن يظلّنا بظلِّه يوم لا ظلَّ إلا ظلُّه .

مؤتمن ميرغني

الاختصارات

ACP Azimuth Clock Pulse

ADC Analog-to-Digital Converter

ADT Automatic Detection and Tracking

AFC Automatic Frequency Control

AGC Automatic Gain Control

AM Amplitude Modulation

ATC Air Traffic Control

ATR Anti Transmit-Receive

BPF Band Pass Filter

B/W Black and White

CA Civil Aviation

CFA Crossed Field Amplifier

CFAR Constant False Alarm Rate

CFD Crossed Field Device

COHO Coherent Oscillator

CRO Cathode Ray Oscilloscope

CRT Cathode Ray Tube

CW Continuous Wave

DAC Digital-to-Analog Converter

DSP Digital Signal Processing

FAR False Alarm Rate

FET Field Effect Transistor

FPF False Plot Filter

FTC Fast Time Constant

GEN Generator

GTC Gain Time Control

HPF High Pass Filter

IAGC Instantaneous AGC

ICAO International Civil Aviation Org

ICBM Intercontinental Ballistic Missile

IFA Intermediate Frequency Amplifier

IFF Identification Friend or Foe

ISLS Interrogator Side-lobe Suppression

LAN Local Area Network

LNA Low Noise Amplifier

LO Local Oscillator

LPF Low Pass Filter

LSB Least Significant Bit or Byte

LTA Local Track Averaging

LVA Large Vertical Aperture

MDS Minimum Detectable Signal

MIX Mixer

MF Matched Filter

MOD Modulator

MSB Most Significant Bit or Byte

MTD Moving Target Detection

MTI Moving Target Indication

MTBF Mean Time Between Failures

MTTR	Mean Time To Repair	RPM	Revolution Per Minute
OTH	Over-the-horizon	RSL	Reduced Side Lobe
OOP	Object-Oriented Programming	RSP	Radar Signal Processor
Pfa	Probability of False Alarms	RSR	Reverse-switching Rectifier
PFN	Pulse Forming Network	RX	Receiver
PLL	Phase Locked Loop	SAM	Surface-to-Air Missile
PPI	Plan Position Indicator	SAR	Synthetic Aperture Radar
PRF	Pulse Repetition Frequency	SAW	Surface Acoustic Wave
PRI	Pulse Repetition Interval	SCR	Silicon-Controlled Rectifier
PSD	Phase Sensitive Detector	SIF	Selective Identification Feature
PSR	Primary Surveillance Radar	STALO	Stable Local Oscillator
RAM	Random Access Memory	STC	Short Time Constant
RCM	Remote Control & Monitoring	SSR	Secondary Surveillance Radar
RCP	Range Clock Pulse	TR	Transmit-receive
RCS	Radar Cross Section	TX	Transmitter
RDE	Radar Data Extractor	TWS	Track-while-scan
RDP	Radar Data Processor	TWT	Traveling Wave Tube
RFA	Radio Frequency Amplifier	VAMP	Video Amplifier
ROM	Read Only Memory	VCO	Voltage-Controlled Oscillator

الرمـوز

A_p	Antenna Aperture
A_v	Amplifier Voltage Gain
B	Bandwidth
c	Speed of Light
DC	Direct Current
D.C.	Duty Cycle
dB	Decibel
dBm	Decibel to a Milli-Watt
dBW	Decibel to a Watt
E_d	Magnetron Hartree Voltage
E_t	Transmitted Energy
f	Frequency
f_d	Doppler Frequency Shift
G	Antenna Gain
G_m	Tube Trans-conductance
$H(f)$	Transfer Function
h(t)	Impulse Response
k	Boltzman's Constant
K	Klystron Factor
knot	Nautical Mile per Hour
n	Positive Integer Number
ñ	Number of Pulses
N	Noise Average Power
N_F	Noise Figure
N_o	Noise Density
nm	Nautical Mile
P_{av}	Average Power
P_{den}	Power Density
P_{peak}	Peak Power
pps	Pulse Per Second
P_d	Probability of Detection
P_{fa}	Probability of False Alarm
P_r	Received Power
P_t	Transmitted Power
P_{tx}	Transmitter Power
R	Slant Range
$R(\tau)$	Autocorrelation Function
S_{min}	Minimum Detectable Signal
SCR	Signal-to-clutter Ratio
SNR	Signal-to-noise Ratio
T	Pulse Repetition Interval
T_d	Time Delay Elapsed
T_o	Absolute Temperature
T_s	Sampling Period
v	Velocity
V_a	Anode Voltage
V_A	Anode Supply Voltage
v_B	Blind Speed

V_g	Grid Voltage	θ_B	Antenna Beamwidth
v_r	Relative Velocity	λ	Wavelength
XOR	Exclusive OR	μ	Permeability
α	Alpha Constant	π	pi Constant
β	Beta Constant	σ	Radar Cross-Section
β	Phase Constant	τ	Pulse Duration
δ_r	Range Resolution	ω	Angular Frequency
ε	Permittivity	Φ	Phase Angle
η	Efficiency	Ω	Antenna Angular Speed

الباب الأول

مقـدمة

1 - 1 فكرة عمل الرادار

يصنف الرادار كواحد من أهم المجسات Sensors المستخدمة للكشف عن الأجسام التي غالباً ما تصعب رؤيتها بالعين المجردة أو بمجسات الرؤية البصرية العادية إمّا بسبب بعدها الشديد أو لتواريها خلف الموانع الطبيعية والصناعية أو بسبب الظلام أو الغمام .

يعمل الرادار على إرسال إشارات موجات كهرمغنطيسية عبر الهواء واستقبال الإشارات المنعكسة من الأجسام المادية الموجودة داخل مجال عمله . تعتمد قوة الإشارة المنعكسة على حجم الجسم المادي العاكس وطبيعة المادة المكونة له وبعده من الرادار . تسمى الأجسام التي تمّ تصميم نظام الرادار لرصدها بالأهداف ، والتي قد تكون أجساماً طائرة كالطائرات والصواريخ أو على سطح الأرض كالسفن والمركبات الأرضية أو تحت سطح الأرض كالألغام المدفونة بباطنها .

إلى جانب استخدامه للكشف عن الأهداف المطلوبة فإنّ الرادار يستخدم لقياس مدى أو بُعد الهدف المرصود . لذلك فإنّ الاسم المتداول للرادار Radar قد جاء من الكشف وقياس المدى بالرادي ***RAdio Detection And Ranging*** . هذا وقد تمّ ابتكار الرادار أثناء الحرب العالمية الثانية في ثلاث دول هي بريطانيا ، الولايات المتحدة وألمانيا بتقنيات ومسميات مختلفة .

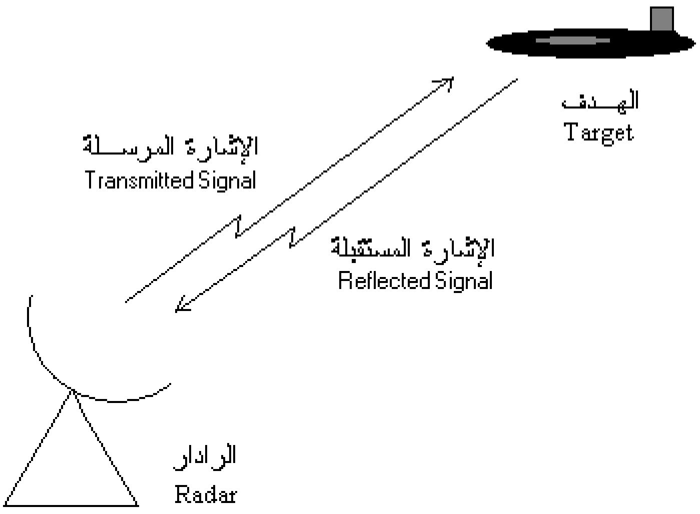
تعتمد فكرة قياس المدى بالرادار على مبدأ ثبات سرعة الموجات الكهرمغنطيسية عبر أي وسط معين والتي تعتمد فقط على الخواص الكهربائية والمغنطيسية لذلك الوسط وتعادل

$$c = 1 / \sqrt{\mu \varepsilon} \qquad 1\text{-}1$$

حيث μ السماحية المغنطيسية للوسط Permeability ، ε النفاذية الكهربية للوسط Permittivity ومقدار تلك السرعة في الهواء حوالي 3×10^8 m/s . يقوم الرادار بحساب زمن ذهاب الموجة المرسلة منه وإياب الموجة المستقبلة إليه بعد انعكاسها من سطح الهدف ومن ثم يتم إيجاد مدى الهدف تبعاً للعلاقة الرياضية

$$R = c\,T_d / 2 \qquad 1\text{-}2$$

حيث T_d الزمن الكلي الذي قطعته الموجة من الرادار إلى الهدف ثمّ إلى الرادار . جاءت القسمة على اثنين بالمعادلة بغرض حساب المدى في اتجاه واحد لرحلة الموجة .



الشكل 1-1 إشارات الرادار

نجد أنّ فكرة قياس المدى بواسطة الرادار هي نفسها التي يستخدمها الوطواط لقياس المدى وبدقة عالية ولمسافات قصيرة تحتاج لسرعة ودقة عاليتين في الحساب . كما أنّ هنالك عدد من الأنظمة الإلكترونية المشابهة للرادار تستخدم نفس مبدأ العمل مثل نظام السونار Sonar ، من الملاحة وقياس المدى بالصوت ***SO**und **N**avigation* ***A**nd **R**anging* ، والذي تستخدمه السفن والغواصات لقياس عمق البحر ومدى الأجسام تحت سطحه . يستخدم السونار الموجات الصوتية بدلاً من الموجات الكهرمغنطيسية وذلك لصعوبة انتشارها عبر الماء لمسافات بعيدة بسبب التوهين العالي الذي تلاقيه ، لا سيما في مياه المحيطات والبحار شديدة الملوحة .

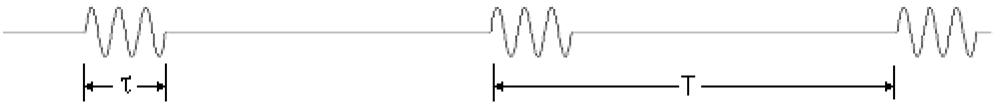
بالإضافة لاستخدام الرادار لقياس المدى ، يمكن قياس زاوية سمت الهدف Azimuth Angle أو اتجاهه من موقع الرادار وزاوية ارتفاعه Elevation Angle من مستوى الرادار . عادة ما يستخدم الرادار هوائياً ذا اتجاهية عالية يعمل على إشعاع الموجات المرسلة وتركيزها في نطاق ضيق يُمكِّن من تحديد اتجاه الشعاع بدقة وبالتالي استقبال الموجات المنعكسة من الأهداف الموجودة في ذلك الاتجاه فقط دون غيرها .

يقوم الرادار بمسح مجال عمله لرصد كل الأهداف الموجودة به وذلك بتحريك شعاع الهوائي الضيق بصورة مستمرة ويؤخذ اتجاه شعاع الرادار لحظة رصد الهدف كزاوية اتجاه أو ارتفاع لذلك الهدف . يتم تحريك شعاع المسح في الفضاء بتحريك الهوائي ميكانيكياً بواسطة محرك كهربي كبير أو إلكترونياً باستخدام هوائي من نوع مصفوفة الطور Phase Array .

1-2 الرادار النبضي

يمكن أن يقوم الرادار بإرسال الموجات الكهرمغنطيسية بصورة مستمرة ، إلاّ أن ذلك يتطلب استخدام هوائيين منفصلين أحدهما للإرسال والآخر للاستقبال . يسمى ذلك النوع من الرادار بالرادار مستمر الموجة Continuous Wave Radar وله استخدامات وتطبيقات عديدة .

أكثر أنواع الرادار شيوعاً لا سيما في نظم الاستطلاع بعيدة المدى هو الرادار النبضي Pulse Radar والذي يستخدم هوائياً واحداً لكل من الإرسال والاستقبال . يتسنى ذلك بإرسال الموجات على شكل نبضات متتالية بصورة دورية ، لكل منها فترة زمنية قصيرة جداً مقارنة بالزمن الدوري بين كل نبضة وأخرى كما بالشكل 1−2 أدناه . لذلك فإنّ الرادار النبضي يكون في حالة إرسال أو حالة استقبال دون تقاطع زمني بين الحالتين ، ويصبح الهوائي غير مستخدم بعد إرسال النبضة وبالتالي يمكن استخدامه لاستقبال النبضات المنعكسة من الأهداف داخل مجال الرادار .



الشكل 1−2 نبضات الرادار

تعرف الفترة الزمنية للنبضة الواحدة بعرض النبضة Pulse Duration ، بينما تعرف الفترة الزمنية بين بداية كل نبضة وأخرى بالزمن الدوري أو بفترة تكرار النبضة Pulse Repetition Interval . كما تعرف النسبة بين كل من عرض النبضة وفترة تكرارها بدورة عمل Duty Cycle الإرسال والتي تُعطى بالعلاقة

$$D.C. = \tau / T \qquad 1\text{-}3$$

حيث τ عرض النبضة ، T فترة تكرارها . يغلب استخدام مقلوب فترة تكرار النبضة والمعروف بتردد تكرار النبضة Pulse Repetition Frequency والذي يُعطى بالعلاقة

$$PRF = 1/ T \qquad 1\text{-}4$$

حتى يعمل الرادار النبضي بصورة صحيحة ، يجب أن تصل إلى الرادار نبضة الصدى Echo Pulse الناتجة عن نبضة مرسلة قبل إرسال نبضة جديدة حتى لا يحدث التباس في قياس المدى Range Ambiguity . بمعنى أنّ ورود نبضة صدى من هدف بعيد قد يؤدي إلى خطأ في تحديد مداه إذ يتمّ حسابه كما لو كانت نبضة الصدى المستقبلة ناتجة من انعكاس لنبضة الإرسال التالية ، وبالتالي يظهر ذلك الهدف أقرب من موقعه الحقيقي .

يسمى مثل هذا الهدف هدفاً ملتبساً Ambiguous Target أو مشكوكاً في مداه من الرادار [1]. يمكن حساب المدى الأقصى للرادار دون حدوث التباس في المدى بالعلاقة

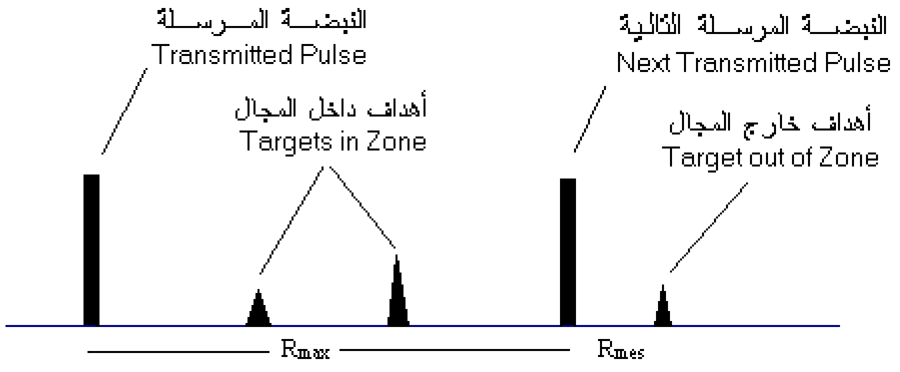
$$R_{max} = c\,T / 2 = c / 2\,PRF \qquad 1\text{-}5$$

نلاحظ من الشكل 1−3 أدناه أنّ المدى الحقيقي R للهدف الملتبس يزيد عن مداه المُقاس بواسطة الرادار R_{mes} بما يعادل المدى الأقصى للرادار ، أو أحد مضاعفاته ، وذلك تبعاً للعلاقة التالية

$$R = R_{mes} + R_{max} \qquad 1\text{-}6$$

ترتفع دقة قياس المدى Range Accuracy للرادار بصغر الخطأ أو الفرق بين كل من القيمة الحقيقية والقيمة المقاسة لمدى الهدف . كما يعرف التمييز في المدى Range Resolution بمقدرة الرادار على التمييز بين هدفين متجاورين في المدى كهدفين منفصلين وليس كهدف واحد . تعتمد كل من الدقة والتمييز في المدى بصورة مباشرة على عرض النبضة الرادارية τ المستخدمة حيث يُعطى التمييز في المدى بالعلاقة التالية

$$\delta_r = c\,\tau / 2 \qquad 1\text{-}7$$



الشكل 1−3 الالتباس في المدى

1 3 ترددات الرادار

تتميز الأنظمة الرادارية بأنها تستخدم نطاقاً كبيراً من الطيف الترددي يمتد ليشمل معظم الترددات الراديّة RF وبعضاً من نطاق الأشعة تحت الحمراء IR .

يختلف تردد أي رادار عن آخر طبقاً لنوع وتطبيق الرادار وحسب طبيعة الأهداف المراد رصدها . بعد ظهور الرادار في أواسط القرن العشرين ، تمّ تقسيم الطيف

الترددي لمجموعات أو حزم ترددية Frequency Bands حتى يسهل تحديد تردد الرادار المعني . نجد أنّ هذه الحزم الترددية الموضّحة في القائمة 1-1 قد امتد استخدامها في مجالات أخرى غير الرادار لا سيما في مجال الأقمار الصناعية . ينحصر نطاق عمل غالبية نظم الرادار الموجودة بين الترددات العالية ونطاق الموجات الدقيقة أو المكروية Microwaves والتي تشكل الحزمة الترددية L الحزمة الدنيا منها .

Frequency Band الحزمة الترددية	**Freq. Range** مدى الترددات
Low Frequency LF الترددات المنخفضة	30 – 300 kHz
Medium Frequency MF الترددات المتوسطة	300 – 3000 kHz
High Frequency HF الترددات العالية	3 – 30 MHz
Very High Frequency VHF الترددات العالية جداً	30 – 300 MHz
Ultra High Frequency UHF الترددات فوق العالية	300 – 1000 MHz
L Band الحزمة	1 – 2 GHz
S Band الحزمة	2 – 4 GHz
C Band الحزمة	4 – 6 GHz
X Band الحزمة	8 – 12.4 GHz
Ku Band الحزمة	12.4 – 18 GHz
K Band الحزمة	18 – 26.5 GHz
Ka Band الحزمة	26.5 – 40 GHz

القائمة 1-1 الحزم الترددية

إلاّ أننا نجد أنّ الطيف الترددي قد تمّ تقسيمه لاحقاً في صورة حزم أو مجموعات موجية وترددية قياسية اعتماداً على الأطوال الموجية وبحيث تبدأ كل حزمة بطول موجي محدد وتنتهي بعشر أمثاله كما بالقائمة 1−2 . بالنسبة لكل أشكال الموجات المختلفة ، نجد أنّ كلاً من الطول الموجي λ بالأمتار وتردد الموجة *f* بالهيرتز ، يرتبطان مع سرعة الموجة في ذلك الوسط c بالعلاقة التالية

$$c = \lambda f \qquad (1\text{-}8)$$

الحزمة الترددية **Frequency Band**	مدى الترددات **Freq. Range**	الطول الموجي **Wavelength**	الحزمة الموجية **Wave Band**
الترددات العالية High Frequency HF	3 – 30 MHz	10 – 100	الموجات الديكامترية Decametric Waves
الترددات العالية جداً Very High Frequency VHF	30 – 300 MHz	1 – 10	الموجات المترية Metric Waves
الترددات فوق العالية Ultra High Frequency UHF	300 – 3000MHz	0.1 – 1	الموجات الدسيمترية Decimetric Waves
الترددات فائقة العلو Super High Freq SHF	3 – 30 GHz	0.01 – 0.1	الموجات السنتيمترية Centimetric Waves
الترددات بالغة العلو Extremely Hi Freq EHF	30 – 300 GHz	0.001 – 0.01	الموجات المليمترية Millimetric Waves

القائمة 1−2 الحزم الموجية والترددية القياسية

1 4 تطبيقات وأنواع الرادار

تتنوع تطبيقات الرادار في المجالين المدني والعسكري بحيث يصعب حصرها وتحديد أنواع كل الأنظمة المستخدمة لكل تطبيق منها والتي تشمل الاستطلاع والمراقبة والملاحة والتوجيه والقياسات والأغراض العلمية والاستكشافية المختلفة .

من حيث موضع الرادار يمكن تقسيم أنواعه إلى رادار أرضي يعمل على رصد الأهداف الجوّية أو الأرضية ، أو رادار بحري Marine Radar تحمله السفن لرصد

الطائرات والسفن ، أو رادار محمول جواً Airborne Radar على طائرة أو قمر صناعي لأغراض الاستطلاع الجوّي أو التصوير الراداري للأرض .

كذلك يمكن تحديد نوع الرادار بعدد الإحداثيات التي يمكنه قياسها كرادار ثنائي البعد Two-Dimensional 2D يقيس فقط مدى واتجاه الهدف وآخر ثلاثي الأبعاد Three-Dimensional 3D يمكنه قياس ارتفاع الهدف إضافة للمدى والاتجاه . كما يمكن تقسيم أنواع أنظمة الرادار من حيث عدد مواقع الهوائيات المستخدمة إذ نجد أنّ أغلب الأنواع أحادية الموقع Monostatic ، إلاّ أن هنالك بعض الأنظمة ثنائية الموقع Bistatic يوجد هوائي الاستقبال الخاص بها في موقع آخر قد يبعد عشرات الأميال من موقع هوائي الإرسال .

عادة يرسل الرادار موجته الخاصة لإضاءة الهدف ولا يحتاج إلى مصدر خارجي لذلك ويعرف في هذه الحالة برادار فعّال Active Radar . إلاّ أننا نجد أن هنالك بعض أنواع الرادار التي تستفيد من إضاءة الهدف بواسطة مصدر آخر مستقل وبالاستفادة من الإشارات المنتشرة حول موقع الهدف من الهدف نفسه أو من المعدات القريبة منه . يسمى هذا النوع بالرادار التأثري Passive Radar ومن أمثلته الباحث الحراري المحمول على الصواريخ المضادة للطائرات والتي تعتمد في توجيهها على الحرارة المنبعثة من المحركات .

رغم كثرة تطبيقات وأنواع النظم الرادارية المستخدمة ، نعرض بعضاً من الأمثلة للنظم الأكثر انتشاراً والمستخدمة في عدد من التطبيقات المدنية والعسكرية ، بعضها ذو طبيعة عملية وبعضها الآخر ذو طبيعة بحثية أو استكشافية . أبرز تلك النظم :

- رادار الإنذار المبكر Early Warning Radar
- رادار الاستطلاع Surveillance Radar
- الرادار الثانوي Secondary Radar
- الرادار مُعيِّن الارتفاع Height Finder
- رادار التتبع Tracking Radar

- رادار التوجيه Guidance Radar
- الرادار الدوبلري Doppler Radar
- رادار قياس الارتفاع Radio Altimeter
- رادار الإرصاد الجوّي Meteorological Radar
- رادار الرصد الفلكي Astronomical Radar
- الرادار الليزري Laser Radar
- رادار المنفذ المركب Synthetic Aperture Radar
- رادار فوق الأفق Over-the-horizon Radar

1 5 أمثلة لأنظمة راداريّة

في نهاية هذا الباب نستعرض بالصور أمثلة لبعض الأنظمة الرادارية المستخدمة في عدة أنحاء من العالم في مختلف المجالات المدنية والعسكرية ولتطبيقات وترددات متنوعة مع ذكر بعض المواصفات العامة لكل نظام وذلك حتى يتيسر للقارئ الربط بين كل من الدراسة النظرية والواقع .

الشكل 1–4 رادار الإنذار المبكر Cobra Dane

الشكل 1−4 أعلاه يوضح صورة لرادار الإنذار المبكر طويل المدى المُسمّى Cobra Dane ، والذي يستخدم للكشف والتتبع الدقيق للصواريخ الباليستية عابرة القارات ICBM . يلاحظ من الصورة الحجم الضخم للهوائي من نوع مصفوفة الطور والمثبت على مبنى وباتجاه معيّن .

الشكل 1−5 أدناه يعرض صورة لرادار الاستطلاع العسكري 1L117 والذي يعمل في النطاق الدسيمتري . وهو رادار ثلاثي الأبعاد يستخدم هوائيين على شكل الحرف V لتشكيل الشعاع المطلوب لحساب ارتفاع الهدف ويدوران باستمرار لمسح المنطقة المحيطة بالرادار . تتميز مثل هذه الأنظمة بمقدرتها على العمل المتواصل واستخدامها لعدة ترددات تمكنها من مكافحة التشويش .

الشكل 1−5 رادار الاستطلاع 1L117

يبين لنا الشكل 1−6 صورة لرادار الاستطلاع المدني Utes-T الذي يُستخدم للتحكم بالحركة الجوية Air Traffic Control لرصد الطيران العابر وتوجيهه في المسارات الجوية الصحيحة ومساعدة الطائرات في الإقلاع والهبوط بالمطارات . الصورة بالشكل 1−7 توضح رادار توجيه الصاروخ المضاد للصواريخ باتريوت Patriot (SAM-D [3] سابقاً) ، وهو رادار قابل للحركة تمّ تصميمه لكشف وتتبع الصواريخ الباليستية التكتيكية متوسطة المدى مثل الصاروخ سكود Scud .

الشكل 1−6 رادار الاستطلاع Utes-T

الشكل 1−7 رادار توجيه الصاروخ باتريوت Patriot

يبين الشكل 1−8 أدناه رادار يعمل على تحديد مواقع المدافع الأرضية لا سيما مدافع الهاون Mortar وذلك برصد القذيفة المنطلقة من المدفع أثناء طيرانها وحساب مسارها لإيجاد موقع المدفع أو لتصحيح الخطأ في التصويب.

الشكل 1−8 رادار تحديد مواقع المدافع

الشكل 1−9 أدناه يعرض صورة لنظام الإنذار المبكر والتحكم المحمول أواكس AWACS . من المعتاد أن يحمل هذا النظام على طائرة من طراز Boeing 707 مخصصة للأغراض العسكرية . نسبة للارتفاع الكبير لمثل هذه المنظومة فهي تغطي مجالاً جوّياً وأرضياً عريضاً مقارنة بالرادار الأرضي .

الشكل 1−9 نظام أواكس AWACS

يبين الشكل 1−10 أدناه صورة لسفينة حربية تحمل أكثر من رادار بحري مثل رادار الاستطلاع لرصد كل من الطائرات والصواريخ والسفن ورادار التوجيه لإرشاد الصواريخ المضادة للطائرات .

الشكل 1−10 رادار بحري

أسئلة وتمارين

1− قارن بين كل من الرادار النبضي والرادار مستمر الموجة مع توضيح شكل إشارات كل منهما وذكر مزايا كل منهما على الآخر .

2− رادار نبضي عرض نبضته المرسلة 1.6μs وتردد تكرارها 300 pps ، أوجد دورة عمل مرسله .

3− في السؤال السابق أوجد كل من دقة قياس المدى والمدى الأقصى للرادار .

4− هدف يبعد عن رادار 600km ظهر بشاشته على بعد 150km ، أوجد تردد تكرار نبضة ذلك الرادار .

5− رادار تردد مرسله 2.7GHz ، حدِّد حزمته الترددية بإتباع كل من طريقتي تقسيم الحزم الترددية المتداولتين .

6− تحدث عن فائدة كل من الرادار فوق الأفق OTH ورادار المنفذ المركب SAR المستخدم في التصوير الجوي والفضائي .

7- وضِّح كيفية مسح المجال الراداري إذا كان الهوائي مثبتاً مثلما في رادار الإنذار المبكر Cobra Dane .

8- من الشكل 1-6 لرادار الاستطلاع Utes-T ، وضح الغرض من القبة اللدائنية Radome الموضوعة حول الهوائي .

9- قارن بين كل من الرادار الفعال والرادار التأثري واذكر مزايا كل منهما على الآخر . تحدث عن إمكانية قياس المدى بواسطة كل منهما .

الباب الثاني

معادلة الرادار

2 1- المدى الأقصى للرادار

توجد عدة مقاييس مستخدمة في تحديد مواصفات الرادار الهندسية والوظيفية مثل التردد والكفاءة والاستمرارية ودقة القياس والمقدرة على مقاومة التشويش . ولكننا نجد أنّ المدى الأقصى للرادار من حيث الكشف يعتبر من أهم مواصفات الرادار الوظيفية ، لا سيما بالنسبة لأنظمة رادار الكشف والاستطلاع والإنذار المبكر .

توجد عدة معادلات تستخدم لتحليل ودراسة أداء الرادار أهمها معادلة المدى الأقصى للرادار والتي تعرف اختصاراً بمعادلة الرادار . تساعد معادلة الرادار على تقدير مدى الرادار بصورة نظرية اعتماداً على كل من القدرة المرسلة ، حساسية الاستقبال ، كسب الهوائي والطول الموجي للرادر بالإضافة إلى خواص الهدف المرصود .

لإيجاد المعادلة من المبادئ الأولية ، نفترض أنّ الرادار يشع موجاته في جميع الاتجاهات بنفس المستوى . كثافة القدرة Power Density عند أي نقطة تبعد R من موقع الرادار بدلالة القدرة الكلية المرسلة P_t تعادل

$$P_{den} = P_t / A = P_t / 4\pi R^2 \qquad 2\text{-}1$$

حيث تتوزع القدرة على سطح كرة وهمية نصف قطرها R . نلاحظ أنّ كثافة القدرة تنخفض إلى الربع عند مضاعفة المدى تبعاً لقانون التربيع العكسي للمسافة .

كما سبق وأشرنا في الباب الأول ، فإنّ هوائي الرادار عادة يكون اتجاهياً Directive يعمل على تركيز شعاع الإرسال في اتجاه محدد ليصبح ضيقاً فيتيح الحصول على دقة عالية في قياس زاوية الهدف ويزيد من كثافة القدرة في ذلك

الاتجاه . إذا كان معامل كسب الهوائي الاتجاهي Directive Gain والذي يزيد بصغر زاوية الشعاع يعادل G ، فإن كثافة القدرة عند النقطة أعلاه تصبح

$$P_{den} = G P_t / 4\pi R^2 \qquad 2\text{-}2$$

إذا كان هنالك هدف عند تلك النقطة ، فإنّ القدرة الكلية الساقطة على سطح ذلك الهدف تعتمد على مساحة سطحه المؤثرة في اتجاه الموجة σ وتعادل

$$P_i = \sigma P_{den} = G P_t \sigma / 4\pi R^2 \qquad 2\text{-}3$$

وإذا ما تمكنت كل القدرة الساقطة على الهدف من الانعكاس من سطحه في كل الاتجاهات بالتساوي ، فإنّ كثافة القدرة المنعكسة تعادل عند موقع الرادار

$$P_{r\,(den)} = P_i / 4\pi R^2 = GP_t\sigma/(4\pi)^2R^4 \qquad 2\text{-}4$$

وبما أنّ القدرة الكلية الساقطة على الهوائي تتناسب طردياً مع مقدار مساحة منفذ الهوائي Antenna Aperture ، لذا فإنّ القدرة المستقبلة بواسطة هوائي الرادار P_r تعادل

$$P_r = P_{r\,(den)} A_p = GP_tA_p\sigma/(4\pi)^2R^4 \qquad 2\text{-}5$$

حيث A_p مساحة منفذ الهوائي والتي ترتبط بمعامل كسبه وطول الموجة المستخدمة بالعلاقة التالية والمأخوذة من نظرية الهوائيات

$$G = 4\pi A_p / \lambda^2 \qquad 2\text{-}6$$

بالتعويض في المعادلة 2-5 تصبح القدرة المستقبلة من الهدف تعطى بالعلاقة

$$P_r = P_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 R^4 \qquad 2\text{-}7$$

المدى الأقصى للرادار هو ذاك المدى الذي لا يمكن للرادار رصد أي هدف أبعد منه . يعتمد ذلك المدى على القدرة المستقبلة من الهدف والتي قد تكون صغيرة جداً بالنسبة للأهداف البعيدة عن الرادار والأهداف صغيرة الحجم ، وبالتالي يعتمد المدى على مقدرة الرادار على الإحساس بتلك القدرات المنخفضة وكشفها . يمكن التعبير

عن حساسية الرادار Sensitivity بأقل قدرة مستقبلة يمكن للرادار كشفها S_{min} ، وبتعويضها في المعادلة 2-7 يصبح أقصى مدى للرادار يعطى بالمعادلة

$$R_{max} = \sqrt[4]{(P_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 S_{min})} \qquad 2\text{-}8$$

2 2 مدلولات معادلة الرادار

تُعطي معادلة الرادار 2-8 تقديراً رياضياً للمدى الأقصى للرادار والذي يزيد بزيادة كل من القدرة المرسلة ، معامل كسب الهوائي ، طول الموجة ، مساحة الهدف وحساسية مستقبل الرادار . في حين يتضاعف المدى بزيادة معامل كسب الهوائي أو الطول الموجي إلى أربعة أمثالها ، فهو يحتاج إلى الزيادة بستة عشر مثل من القدرة المرسلة أو الحساسية .

إلاّ أنّنا نجد أنّ معادلة الرادار 2-8 قد أهملت عدداً من العوامل الطبيعية والهندسية والتي تؤثر بصورة مباشرة في تحديد مدى الرادار . لذا تعتبر تلك المعادلة إحدى الصور المبسطة لمعادلة الرادار الشاملة وتشكل أساساً لها يمكن تكملته بإضافة العوامل المؤثرة الغائبة .

أول عامل طبيعي لم يرد ذكره في المعادلة هو التوهين Attenuation الذي تعانيه الموجات الكهرمغنطيسية في طريقها من وإلى الرادار . ينشأ التوهين نتيجة لامتصاص جزيئات الغلاف الجوّي للطاقة من الموجة أثناء انتشارها فيه ويزيد بزيادة التردد وزيادة كثافة كل من بخار الماء والسحب والغبار . نلاحظ الأثر المتزايد لزيادة الطول الموجي في زيادة مدى الرادار لتناسبه العكسي مع التردد بالإضافة لتأثيره الماثل من المعادلة 2-8 أعلاه . لذلك نجد أنّ الأنظمة الرادارية بعيدة المدى تميل لاستخدام ترددات منخفضة نسبياً .

من العوامل المؤثرة في مدى الرادار كذلك الضوضاء بأشكالها المختلفة الطبيعية والصناعية والتي عادة ما تصاحب الإشارة المستقبلة من الهدف ويصعب التخلص منها بصورة كاملة . تؤثر الضوضاء في حساسية الرادار وبالتالي تحد من مداه حيث أنّ زيادة الحساسية في ظل جود الضوضاء قد يؤدي إلى ظهور ما تعرف بالإنذارات

الكاذبة ما لم تتوفر معالجة جيدة للإشارات المستقبلة . كما أنّ ازدياد متوسط قدرة الضوضاء عن القدرة المستقبلة من الهدف يصعب من كشفه ناهيك عن تحديد إحداثياته.

عامل ثالث مهمل في معادلة الرادار أعلاه وهو عدم استقرار نظام استقبال الرادار نفسه نتيجة لعدم استقرار مكونات الدوائر الإلكترونية بصورة كاملة مما ينشأ عنه عدم استقرار قيمة أقل إشارة مكتشفة لتغير معاملات التكبير ودوائر ضبط الترددات المختلفة .

العامل المؤثر الأخير المهمل بالمعادلة هو عدم ثبات المساحة الفعالة للهدف والتي تتغير بتغير محاور واتجاه الهدف بصورة مستمرة مما يؤثر في استقرارية القدرة المستقبلة منه . لأهمية العامل الأخير وأثره في تحديد مدى الرادار يتوالى الحديث عنه فيما يلي بالتفصيل بعون الله .

2 3 المقطع الراداري للهدف

تعرف المساحة الفعالة للهدف الواردة بمعادلة الرادار أعلاه اصطلاحاً بالمقطع الراداري Radar Cross Section ، وتختصر بالأحرف RCS . يعتمد المقطع الراداري بصورة عامة على مادة الهدف وعلى شكله الهندسي .

عند سقوط أشعة كهرمغنطيسية على أي جسم ، فإنّ جزءاً من الطاقة الساقطة ينعكس عند سطح الجسم (أو يعاد إشعاعه) وينفذ جزءٌ منها عبر الجسم بينما يتم امتصاص الجزء المتبقي بواسطة جزئيات مادته ليتحول إلى طاقة حرارية مبددة . يلاحظ ذلك في حالة سقوط ضوء الشمس على الزجاج حيث ينعكس جزءٌ من الضوء يمكّننا من رؤية الزجاج من الخارج وينفذ جزءٌ خلاله بينما يمتص الجزء المتبقي من الطاقة والذي يرفع درجة حرارة الزجاج . تختلف حصص الطاقة لكل جزء حسب خواص مادة الجسم والتي يمكننا تسميتها اصطلاحاً بالانعكاسية ، الشفافية والامتصاصية Reflectivity, transparency and absorbability .

من قوانين الانعكاس نعلم أنّ زاوية الانعكاس تساوي زاوية السقوط عند أي نقطة على السطح العاكس . ترتد في اتجاه الرادار تلك الأشعة التي تسقط عمودية على سطح الهدف بينما يشتت الهدف الأشعة غير العمودية على سطحه في اتجاهات أخرى ولا تصل إلى الرادار . وبما أن الأهداف الحقيقية ليست ألواحاً مسطحة ، نجد أنّ أجزاءً من الهدف تعكس جزءاً من الطاقة في اتجاه الرادار بينما تشتِّت الأجزاء الأخرى منه القسم الأكبر من الطاقة ولا يصل إلى الرادار إلاّ إذا ما تمّ عكسه مرة أخرى بواسطة جسم آخر .

تمت الاستفادة من أثر الشكل الهندسي للهدف في إخفاء الأهداف عن الرادار وذلك بتصميم طائرات وصواريخ ذات أشكال هندسية غير منتظمة الأسطح تعمل على تشتيت الأشعة الساقطة عليها . كما تمّ ابتكار مواد ذات امتصاصية عالية للأشعة الرادارية وتعرف بمواد التَسلُل Stealth Materials تستخدم لطلاء جسم الطائرة أو الصاروخ فينقص مقطعه الراداري ويصعب كشفه . مثال لذلك الطائرة F117 المعروضة بالشكل 2−1 والتي تعرف أيضاً باسم Stealth أو الشبح ، والقاذفة B2 والصاروخ الطوّاف من نوع توماهوك Tomahawk .

الشكل 2−1 الطائرة F117

كذلك نجد أن المقطع الراداري للهدف يعتمد على كل من استقطاب الموجة الساقطة Polarization (أي اتجاه المجال الكهربي بها) وزاوية ميلان محور الهدف

العمودي على اتجاه انتشار الموجة . يتناقص المقطع الراداري في حال عدم توازي محور الهدف مع استقطاب الموجة إلى أن يتلاشى عند تعامدهما على بعضهما . نجد أنّ الاستقطاب الأفقي هو الأكثر شيوعاً في الرادار لأنّ جناحَي الطائرات تكون أفقية في معظم الوقت حتى لا تفقد قوة رفعها . مما يجدر ذكره وجود كثير من الأنظمة تستخدم أكثر من استقطاب لزيادة المقدرة على كشف عدد أكبر من الأهداف بما يعرف بالتنوع في الاستقطاب Polarization Diversity .

نسبة للتغير المستمر في اتجاهات محاور الهدف ولعدم انتظام سطحه ، يمكن تمثيل الهدف بكرة معدنية يقع مركزها عند موقعه وتعكس قدرة تعادل القدرة المنعكسة منه . ويتضح سبب اختيار الكرة دون الأشكال الهندسية الأخرى لتساوي إسقاطها الهندسي دائري الشكل من كل الاتجاهات والذي يمثل المقطع الراداري للكرة المعدنية . يستفاد من هذا التمثيل في قياس مدى الرادار بصورة فعلية وذلك بتعليق كرة معدنية ببالون طائر ورصدها بواسطة الرادار .

تنقسم الأهداف من حيث المقطع الراداري إلى قسمين هما أهداف نقطية Point Targets يمكن تحديد مواقعها بصورة واضحة لصغر أحجامها كالطائرات التي تطير منفردة ، وأهداف موزعة Distributed Targets لا يمكن تحديد مواقعها وتؤخذ مراكزها الهندسية كتقدير لموقع هدف واحد يمثل أي منها ، وهي مثل سلاسل الجبال وأسراب الطائرات المتقاربة .

2 4 طيف الإشارة الرادارية

يتضح من شكل الإشارة الرادارية المبينة بالشكل 2−1 أنها إشارة دورية لها زمن دوري ثابت يعادل فترة تكرار النبضة T . إذاً يمكن إيجاد متسلسلة فورير للتعبير عن طيف الإشارة في النطاق الترددي كمجموع إشارات جيبية Sinusoids وحيدة التردد والتي يعبر عنها رياضياً بالمتسلسلة

$$v(t) = a_o/2 + \Sigma\, a_n \cos(2\pi nt/T) + \Sigma\, b_n \sin(2\pi nt/T) \qquad 2\text{-}9$$

حيث $n = 1,2,\ldots\infty$ والعوامل a_n ، b_n يمكن إيجادها من العلاقات

$a_n = 2/T \int v(t) \cos(2\pi nt/T)\, dt$ 2-10

$b_n = 2/T \int v(t) \sin(2\pi nt/T)\, dt$ 2-11

لكل قيم $-T/2 \le t \le T/2$. يمكن التعبير عن إشارة النبضة الرادارية التي عرضها τ ومطالها A في النطاق الزمني بالدالة

$v(t) = A \cos(2\pi f_c t) \quad -\tau/2 \le t \le \tau/2$ 2-12

$= 0 \quad$ elsewhere

حيث f_c تردد الموجة الجيبية الذي يعادل تردد الرادار للنبضة المرسلة أو التردد المتوسط في المستقبل . بإجراء التكاملات أعلاه للقيم $-\tau/2 \le t \le \tau/2$ نحصل على

$a_n = A\tau/T\{\text{sinc}(\tau(f_c - n/T)) + \text{sinc}(\tau(f_c + n/T))\}$ 2-13

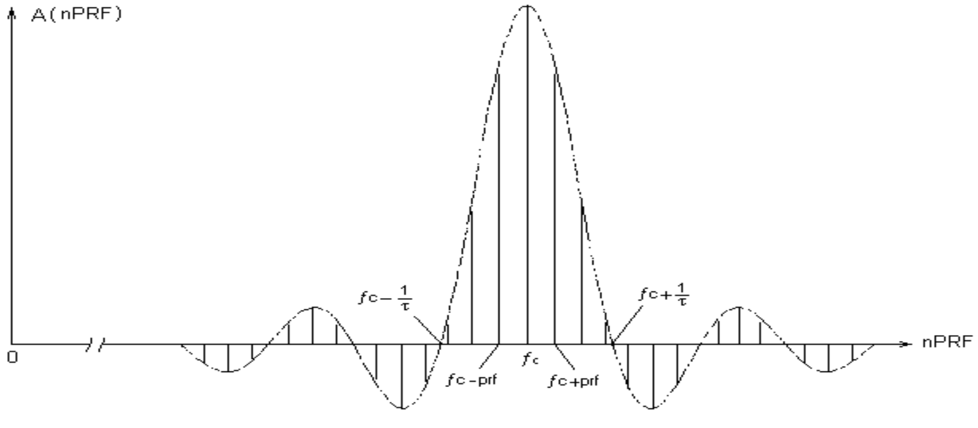
$b_n = 0$ 2-14

حيث $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / \pi x$. يمكننا كتابة مقدار طيف مطال الإشارة بدلالة تردد تكرار النبضة PRF كما يلي

$A(nPRF) = A\tau PRF\, \text{sinc}(\tau(f_c - nPRF))$ 2-15

$A\tau PRF\, \text{sinc}(\tau(f_c + nPRF)) \approx 0$ 2-16

حيث قمنا بتجاهل الحد الثاني لضآلة أثره مع كبر التردد . الشكل 2−2 أدناه يوضح شكل طيف مطال إشارة الرادار Amplitude Spectrum والمأخوذ من تحليل متسلسلة فورير للإشارة .



الشكل 2−2 طيف الإشارة الرادارية

2 5 أقل إشارة مكتشفة

تعرف أقل إشارة مكتشفة بواسطة الرادار Minimum Detectable Signal وتختصر بالأحرف MDS بأنها تلك الإشارة التي تساوي قدرتها القدرة المتوسطة للضوضاء المصاحبة لها . ويأتي هذا التعريف لصعوبة تمييز إشارة الهدف وسط الضوضاء ما لم تساوي أو تزيد قدرتها عن القدرة المتوسطة للضوضاء ، إلا بإيجاد وسائل متقدمة لمعالجة الإشارة وتحسينها .

الضوضاء هي إشارات عشوائية تنتج من ظواهر طبيعية كالصواعق والبرق ومن أجرام سماوية كالشمس والنجوم الأخرى بما يعرف بالضوضاء الكونية Cosmic Noise . كما يمكن أن تنتج الضوضاء من مصادر صناعية كالمعدات الكهربية والإلكترونية المختلفة . يمكن إضافة التداخل الناتج من أنظمة الاتصالات والرادار المجاورة كنوع من الضوضاء الصناعية غير المقصودة مقارنة مع التداخل المقصود بغرض تشويش الرادار من جهات معادية بغرض تقليل مقدرة كشفه أو لتضليله وتقليل دقة قياسه .

أهم أنواع الضوضاء هي الضوضاء الحرارية Thermal Noise ، وتنتج في كل الموصلات الكهربائية والقطع الإلكترونية نسبة للحركة العشوائية للإلكترونات الناشئة عن اكتساب الطاقة الحرارية . وتمتاز الضوضاء الحرارية بطيف ترددي لا متناهي تنتشر عليه بقدرة متوسطة لها نفس الكثافة عند كل الترددات ، وتعادل

$$N = k T_o B \qquad 2\text{-}17$$

حيث k ثابت بولتزمان ويعادل 1.38×10^{-23} J/K ، T_o درجة الحرارة المطلقة ، B السعة الترددية لقناة الاستقبال والتي لا يقصد بها سعة نصف القدرة (أو سعة 3dB) المعتاد استخدامها بل تعطى بالعلاقة

$$B = \int |H(f)|^2 df \; / \; |H(f_o)|^2 \qquad 2\text{-}18$$

أي تكامل مربع مقدار Magnitude دالة نقل القناة مقسوماً على مربع المقدار عند التردد الأوسط للقناة [1]. ويتضح من المعادلة 2-17 التناسب الطردي للقدرة المتوسطة

للضوضاء الحرارية مع السعة الترددية والتي يصعب تقليلها بصورة كبيرة بدون تشويه إشارات الرادار ذات النبضات الضيقة والنطاق الترددي العريض الموضح بالشكل 2−2 .

تعرَّف نسبة الإشارة إلى الضوضاء Signal-to-noise Ratio على أنها النسبة بين قدرة الإشارة المستقبلة المطلوبة والقدرة المتوسطة للضوضاء المصاحبة لها ، أي

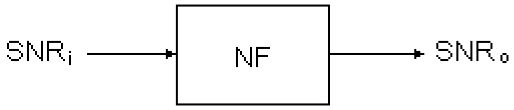
$$SNR = P_r / N \qquad 2\text{-}19$$

وتعادل بوحدة الديسيبل Decibel

$$SNR = 10 \log_{10} (P_r / N) \quad dB \qquad 2\text{-}20$$

بالنسبة للإشارات تعبر نسبة الإشارة إلى الضوضاء عن الضوضاء المصاحبة ، أمّا بالنسبة للأنظمة فإنه يقاس مقدار ما يضيفه النظام من ضوضاء إلى الإشارة المارة به بمعامل ضوضاء النظام Noise Figure وهو النسبة بين نسبة الإشارة إلى الضوضاء عند مدخله إلى تلك عند مخرجه وتعطى بالعلاقة

$$N_F = SNR_i / SNR_o \qquad 2\text{-}21$$



الشكل 2−3 معامل الضوضاء

في حال افتراض وجود الضوضاء الحرارية فقط وباستخدام المعادلة 2-17 والمعادلة 2-19 ، فإنّ قدرة أقل إشارة مكتشفة بواسطة الرادار بدلالة أقل نسبة إشارة إلى الضوضاء يمكن اكتمال الكشف بها تعادل

$$S_{min} = k\, T_o\, B\, SNR_{min} \qquad 2\text{-}22$$

لذلك يمكننا إعادة كتابة معادلة الرادار 2-8 بأخذ الضوضاء الحرارية في الحسبان وتجاهل المصادر الأخرى للضوضاء لتتحول إلى شكل آخر من أشكال المعادلة على النحو التالي

$$R_{max} = \sqrt[4]{P_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 k T_o B\, SNR_{min}} \qquad 2\text{-}23$$

2 6 القدرة المرسلة

تعرَّف القدرة بأنها معدل إنتاج الطاقة أو معدل استهلاكها بالنسبة للزمن . تظهر قدرة النبضة المرسلة في معادلة الرادار كعامل أساسي في تحديد أقصى مدى للرادار ، لذا عادة ما نجد أنّ الرادار النبضي بعيد المدى يتميز بقدرة إرسال ضخمة قد تصل إلى أكثر من ميقاواط .

من قواعد الطبيعة الأساسية عدم فناء الطاقة أو استحداثها فهي إذا ما فقدها نظام اكتسبها غيره . حتى يتمكن الرادار النبضي من إرسال قدرة كبيرة ، فإنه يقوم بتخزين الطاقة الكهربية القادمة من مصدر تغذيته خلال فترة الاستقبال الطويلة التي لا يحدث فيها إرسال . وعند الإرسال يقوم الرادار بتحويل كل الطاقة المخزونة إلى الهوائي لإشعاعها في فترة قصيرة تعادل عرض نبضة الإرسال كما يتضح من الشكل 2–4 أدناه .

الشكل 2–4 رفع القدرة القصوى

بدلالة المعادلة 3-1 ، تتميز إشارة الرادار النبضي بقصر نبضاتها وبالتالي بدورة عمل صغيرة جداً تصل لأقل من 0.001 أو 0.1% مما يتيح الحصول على قدرة قصوى Peak Power كبيرة خلال زمن النبضة . ونجد أن القدرة القصوى المرسلة P_t تتناسب مع القدرة المتوسطة Average Power خلال كل فترة تكرار النبضة P_{av} بالعلاقة التالية

$$P_t = P_{av} / D.C. \qquad 2\text{-}24$$

حيث .D.C دورة العمل . القدرة المتوسطة هي القدرة اللازمة من وحدات التغذية ومصادر القدرة وعادة ما تكون في حدود عشرات الكيلو واط لرادار الاستطلاع . ومما

يجب مراعاته لدى مصمم الرادار عدم زيادة القدرة القصوى بأكثر مما يستلزمه المدى المستهدف للرادار وإلاّ فإنّ احتمالية حدوث التباس في المدى بالتقاط أهداف خارج نطاق الرادار تصبح كبيرة .

من تعريف القدرة فإنّ الطاقة المرسلة خلال النبضة الكهرمغنطيسية الواحدة ترتبط مع القدرة القصوى وعرض النبضة بالعلاقة

$$E_t = P_t \tau \qquad 2\text{-}25$$

وبالتعويض في معادلة الرادار 2-23 بدلالة الطاقة المرسلة بدلاً من القدرة ، يصبح شكل المعادلة هو

$$R_{max} = \sqrt[4]{E_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 k T_o B \tau \, SNR_{min}} \qquad 2\text{-}26$$

من الشكل 2−2 نلاحظ أن معظم طيف النبضة الرادارية محصور في نطاق ترددي محدد بأول قيمة صفرية لغلاف مطال الإشارة عند مقلوب عرض النبضة ، لذا فلتقليل الضوضاء والتي تزيد بزيادة السعة الترددية للرادار تُحدد سعة قناة الاستقبال في كثير من الأنظمة بالقيمة

$$B = 1 / \tau \qquad 2\text{-}27$$

كما يرد في الباب الرابع ، لتصبح معادلة الرادار بدلالة الطاقة المرسلة للنبضة كما يلي

$$R_{max} = \sqrt[4]{E_t G^2 \lambda^2 \sigma / (4\pi)^3 k T_o \, SNR_{min}} \qquad 2\text{-}28$$

من معادلة الرادار 2-28 نلاحظ اعتماد المدى على الطاقة المرسلة وليس على القدرة فقط كما قد يبدو بل يزيد بزيادة عرض النبضة . هذه العلاقة متوقعة لأنّ الحصول على معلومات أكبر عن الهدف يحتاج إلى زمن أطول لاستخلاصها من نبضة الصدى . يمكن أن نضرب مثالاً لذلك بشخص داخل غرفة مظلمة ويحمل مصباحاً يرسل الضوء على شكل نبضات متقطعة فإنه يحتاج إلى فترات إضاءة كافية ليتبين الأشياء داخل الغرفة المظلمة . كذلك يتأثر المدى بالفقد في طاقة الإشارة أثناء مرورها بالغلاف الجوي الأمر الذي يتطلب زيادة الطاقة المرسلة .

استخدام إشارات ذات نبضات عريضة يمكّن من تقليل القدرة القصوى المرسلة اللازمة لتغطية مدى كبير ، وبالتالي توظيف مرسلات ذات قدرات منخفضة مثل أدوات الحالة الجامدة . إلاّ أنّ زيادة عرض النبضة الرادارية يقلل من دقة القياس والتمييز في المدى كما يتضح من المعادلة 7-1 ، كما أنه يرفع من دورة عمل وحدات الإرسال ذات القدرات العالية مما يزيد الحمل عليها ويزيد احتمالية تلفها .

لزيادة عرض النبضة المرسلة وبالتالي المدى دون التقليل من دقة القياس والتمييز في المدى تستخدم تقنية ضغط النبضة Pulse Compression . يتم تعديل طور أو تردد الإشارة المرسلة بشكل معين ثم ترسل الإشارة على شكل نبضات عريضة إلى الهوائي . بعد انعكاسها من الهدف ، يتم ضغط النبضات المستقبلة بواسطة مرشحات خاصة للحصول على دقة عالية جداً في تحديد المدى .

القدرة أو الطاقة المرسلة الواردة في معادلة الرادار هي قدرة أو طاقة النبضة الكهرمغنطيسية بعد إشعاعها من الهوائي وليست كل القدرة أو الطاقة الكهربائية المنتجة بواسطة الرادار وذلك للفقد الذي يحدث ببعض وحدات النظام نفسه والتي أبرزها الهوائي ، دوائر الربط وخطوط النقل . يعمل الهوائي على تحويل معظم الطاقة الكهربائية المنتجة وليس كلها إلى موجات كهرمغنطيسية ، وذلك بسبب الفقد Loss الذي يصاحب عملية تحويل الطاقة Energy Conversion .

يمكن حساب الفقد في القدرة بمعرفة كفاءة الهوائي وهي النسبة بين قدرة خرجه المرسلة وقدرة دخله كما توضح العلاقة التالية

$$\eta = P_t / P_i \qquad 2\text{-}29$$

يمكن قياس القدرة الكلية المنتجة بواسطة مرسل الرادار بتمريرها إلى حمل متوافق مع المرسل عبر جهاز قياس القدرة أو الواطمِتر الرادي RF Wattmeter . لحساب المدى ، يجب طرح الفقد الكلي L الناتج في الهوائي ودوائر الربط وخطوط النقل من القدرة الكلية المنتجة بواسطة المرسل P_{tx} حسب العلاقة التالية

$$P_t = P_{tx} - L \quad dB \qquad 2\text{-}30$$

أسئلة وتمارين

1- اشرح المقصود من المقطع الراداري للهدف والعوامل المؤثرة به .

2- رادار درجة حرارة وسطه $27^{\circ}C$ والسعة الترددية لمستقبله 1.2MHz ، أوجد قيمة أقل إشارة مكتشفة بواسطة ذلك الرادار منسوبة لملي واط

3- أوجد قدرة الإشارة المكتشفة لهدف مقطعه الراداري $5m^2$ ويبعد عن الرادار 400km إذا كانت القدرة المتوسطة المرسلة 10kW ، تردد الرادار 3GHz ، دورة عمله 1% ، معامل كسب الهوائي 1000 وفقد الخط الناقل والهوائي 2dB .

4- مرسل رادار نبضي تردده 3GHz يعمل بدورة عمل 1% وقدرة متوسطة 10kW ، احسب القدرة القصوى المرسلة في اتجاه الهوائي إذا كانت مساحته $0.8m^2$ وكفاءته 90% .

5- استنبط معادلة المدى للرادار النبضي بدلالة الطاقة المرسلة .

6- أوجد نسبة الإشارة للضوضاء في مدخل ومخرج مستقبل معامل ضوضائه 4dB لهدف مقطعه الراداري $0.5m^2$ ويبعد عن الرادار 100km إذا كانت طاقة النبضة المرسلة 1J ، تردد الرادار 300MHz ، معامل كسب الهوائي 30dB ، درجة الحرارة 27°C . ثابت بولتزمان يعادل $1.38x10^{-23}$ J/K .

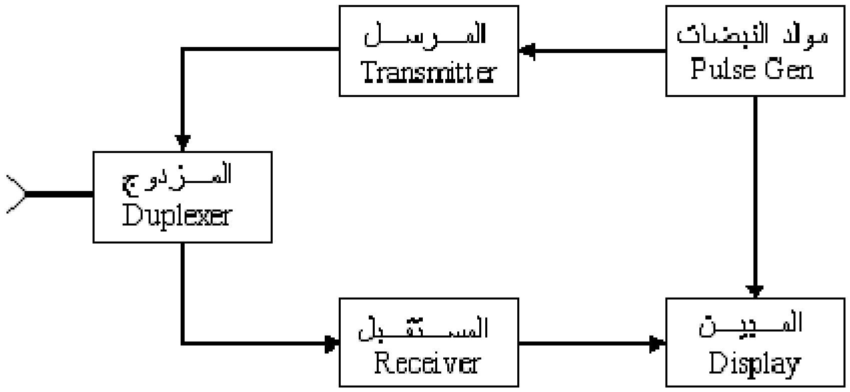
الباب الثالث

تركيب الرادار

3-1 المخطط الصندوقي

يتألف نظام الرادار من عدة وحدات تعمل مجتمعة لتحقيق المهام التي صمم من أجلها النظام مثل الكشف عن الأهداف وقياس إحداثياتها ومن ثم عرض تلك المعلومات بصورة تمكن الإنسان من الاستفادة منها بصورة سهلة وسريعة في نفس الوقت .

الشكل 3-1 يوضح المخطط الصندوقي العام لرادار نبضي فعال أحادي الهوائي يتألف من عدة وحدات مستقلة . المخطط لا يشمل بعض الوحدات بالرادار مثل وحدات التغذية بالقدرة ووحدات التحكم بحركة الهوائي ووحدات التهوية والتبريد .



الشكل 3-1 المخطط الصندوقي للرادار

يعمل الهوائي Antenna عند الإرسال على تحويل التيارات الكهربية عالية التردد والقدرة والمنتجة بواسطة قناة الإرسال إلى موجات كهرمغنطيسية بنفس التردد وتركيزها بإشعاعها في اتجاه محدد . كما يعمل أثناء الاستقبال على تحويل الإشارات الكهرمغنطيسية المنعكسة من الأهداف إلى جهود كهربية ضعيفة لها نفس تردد الإرسال .

يعتمد نوع الهوائي المستخدم على وظيفة الرادار وتردده واستقطاب موجته وشكل الشعاع المطلوب . في بعض الحالات تصل الطاقة المنتجة إلى الهوائي على شكل موجات كهرمغنطيسية عبر دليل موجة Waveguide أجوف وليس على شكل تيارات كهربية عبر الكوابل فيقوم الهوائي بتوجيهها حسب شكل الشعاع دون الحاجة إلى تحويل شكل الطاقة .

المُزدوِج Duplexer أو مفتاح الهوائي وحدة مُزدوِجة الدخل لازمة لأي رادار أو نظام اتصال يستخدم هوائياً واحداً لكل من الإرسال والاستقبال . يعمل المزدوج على تمرير إشارة الإرسال عالية القدرة إلى الهوائي وحجبها عن دوائر الاستقبال لحمايتها من التلف ، بينما يقوم بتمرير إشارة الصدى المستقبلة من الهوائي إلى المستقبل وحجبها عن دوائر الإرسال ذات الممانعة المنخفضة حتى لا يحدث بها فقد يؤدي إلى تقليل حساسية الرادار .

يقوم المرسل Transmitter بإنتاج نبضات جيبية عالية التردد والقدرة وباستقرارية كبيرة في كل منهما وذلك لضمان استقرار إشارات الصدى المرتدة من الأهداف . يُحدث عدم استقرار الإشارة تشوهاً في المعلومات عن خواص الهدف المصاحبة للإشارة ويقلل من دقة هذه المعلومات . نسبة لكبر قدرته ، عادة ما يستخدم المرسل جهوداً كبيرة تعقّد تصميمه وتستلزم الوقاية منها ومما قد يصاحبها من إشعاعات ضارة بالإنسان .

دور المستقبل Receiver هو تكبير إشارات الصدى الضعيفة القادمة من الهوائي عبر المزدوج ومعالجتها لتحسينها ولتقليل أثر الضوضاء المصاحبة لها وتحجيم الإشارات القادمة من أهداف غير مرغوب فيها . كما يقوم المستقبل باستخلاص إشارة الهدف وكشفها لعرضها بصورة مرئية حيث تعرف إشارة خرج المستقبل بإشارة الفيديو (الصورة) Video Signal .

يعرض المبين Display على شاشته الأهداف المرصودة بواسطة الرادار من إشارة الفيديو بصورة مرئية مريحة للعين ويمكن للشخص الجالس أمام الشاشة تحديد

إحداثيات الهدف من موقع الرادار بطريقة بيانية أو رقمية سهلة وسريعة . كما يمكنه أيضاً التحكم بشدة الإضاءة أو التباين أو تركيز الصورة وكذلك التقريب والتبعيد Zooming وإظهار العلامات المساعدة وما شابه ذلك حسب رغبته .

يعتبر مولّد النبضات Pulse Generator الحاكم الأساسي للتزامن بالرادار ، حيث يقوم بالتحكم في لحظة إرسال النبضة من المرسل وتحديد تردد تكرار النبضة PRF وبذلك يكون المنوط به تحديد المدى الأقصى للرادار دون حدوث التباس وفقاً للمعادلة 1-5 . كذلك يرسل المولد نبضات التزامن إلى المبين لضمان عرض الهدف على شاشته بمداه الصحيح .

2-3 هوائي الرادار

يمكن النظر إلى الهوائي على أنه محوِّل للطاقة Transducer من طاقة كهربية إلى طاقة كهرمغنطيسية في حالة الإرسال ومن طاقة كهرمغنطيسية إلى كهربية في حالة الاستقبال .

يتكون الهوائي من عدة عناصر أهمها عنصر الإشعاع أو المشع Radiator والذي يتكون في أبسط صوره من سلك معدني يمر به تيار كهربي عالي التردد قادم عبر المغذي Feeder مسبباً مجالاً كهرمغنطيسياً حول السلك له نفس تردد التيار . ينتشر المجال من المشع مباشرة ليقوم بتغذية بقية أجزاء الهوائي بالطاقة الكهرمغنطيسية والتي تعمل بدورها على تشكيل شعاع الانتشار وتحديد اتجاهه .

في بعض الهوائيات البسيطة المستخدمة في عدد من أنواع الاتصالات اللاسلكية نجد الهوائي عبارة عن مشع لا أكثر دون الحاجة لأجزاء أخرى حيث تعتمد الاتجاهية Directivity على نوع المشع كالهوائي ثنائي القطب Dipole أو هوائي الحلقة . كما نجد في كثير من أنظمة الرادار التي تستخدم الموجات المكروية أن المشع يستقبل الطاقة بصورتها الكهرمغنطيسية عبر دليل موجة Waveguide دون الحاجة إلى تحويلها بل يكون على شكل بوق Horn يشكل نهاية دليل الموجة ويضمن توافقه مع

الفراغ . يستخدم دليل الموجة لتغذية الهوائي في نطاق الموجات المكروية ولا تستخدم الكوابل المحوريّة للفقد الذي يحدث بها عند تلك الترددات .

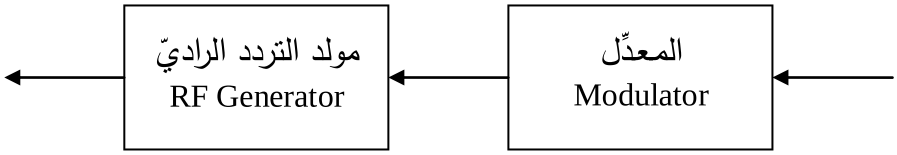
غالباً ما يشتمل هوائي الرادار على عاكس Reflector يمنع انتشار الموجات في الاتجاه المعاكس بل يعكسها إلى الأمام لزيادة كثافة القدرة المرسلة . يساعد سطح العاكس الباربولي المقعرّ في تحديد زاوية الشعاع Beamwidth المطلوبة للحصول على الدقة اللازمة لقياس زاوية الهدف . تعتمد استطالة العاكس على زاوية الهدف المراد قياسها إذ يكون مستعرضاً في حال استهداف قياس زاوية الاتجاه أو السمت Azimuthكما هو الحال في رادار الاستطلاع ثنائي الإحداثيات 2D ، ورأسياً في حال قياس زاوية الارتفاع Elevation كما في بعض مُعيِّنات الارتفاع Height Finders . يكون العاكس دائري الشكل على شكل طبق Dish في حال ضرورة قياس كل من الزاويتين كما هو الحال في أنظمة رادار التتبع .

يعتبر العاكس أكبر وحدات الهوائي من حيث الحجم والكتلة مما يجعله عنصراً أساسياً في التصميم الميكانيكي والإنشائي للهوائي ، إذ تحتاج كتلته الكبيرة فيما تحتاج إلى محركات ضخمة لتحريكها . كما أنّ كبر حجم العاكس يزيد من تأثير الرياح على حركة الهوائي الأمر الذي يستحسن معه صنع العاكس على شكل شبكة معدنية تسمح بمرور الهواء عبرها . كما يجب المحافظة على عاكس الهوائي من الصدمات والتي قد تتسبب في انبعاج سطحه وبالتالي تؤدي إلى تغير شكل الشعاع المطلوب وربما إلى الإخلال بتوافق الهوائي مع خط النقل أو دليل الموجة .

بعض الهوائيات تحتوي على عناصر أخرى خلاف المشعات والعواكس مثل العدسات Lens المستخدمة لتركيز الشعاع والقبة اللدائنية Radome المستخدمة لحماية الهوائي . كما تستخدم بعض الهوائيات أيضاً الموجِّهات Directors وهي عناصر إشعاع غير مُغذاة Parasitic وذلك لزيادة معامل الكسب المتجه للهوائي . كما نجد أنّ بعض أنواع الهوائيات مثل مصفوفات الطور تستخدم عدة مشعات دون الحاجة إلى عواكس للحصول على شكل الشعاع المنشود .

3-3 مرسل الرادار

غالباً ما يتركب مرسل الرادار النبضي من وحدتين أساسيتين هما مولِّد التردد الرادي RF Generator والمعدّل Modulator كما بالمخطط الصندوقي بالشكل 3−2 .



الشكل 3−2 مرسل الرادار

يتمّ تصميم مولد التردد الرادي لينتج إشارة جيبية مستمرة ذات قدرة عالية واستقرارية كبيرة . يتحقق ذلك باستخدام أداة إلكترونية أو موجية ذاتية التذبذب Self-oscillating كصمام الماغنترون ، أو بتوليد إشارة التردد الرادي بواسطة وحدات منخفضة القدرة ثم تكبيرها باستخدام مكبر قدرة كصمام الكلايسترون .

الطريقة الأخيرة توفر استقرارية كبيرة في إشارة الخرج كما تسهل من تصميم أنظمة رادارية متطورة يستفاد فيها من طور الإشارة المستقبلة لقياس سرعة الهدف ولإجراء معالجة للإشارة تتيح إلغاء الأهداف الثابتة بما يعرف بتمييز الأهداف المتحركة والذي يرد تفصيله في الباب الخامس بعون الله .

يتمّ اختيار الأداة المستخدمة لإنتاج القدرة العالية بمولد التردد الرادي بمرسل الرادار تبعاً للقدرة القصوى والكفاءة المطلوبتين وحسب تردد الرادار واستقراريته وقابليته للتغيير . من حيث مبدأ عملها ، يمكن تقسيم تلك الأدوات إلى الأقسام الأربعة التالية :−

- الصمامات أو الأنابيب الفراغية Vacuum Tubes الحرارية مثل الصمام الثلاثي المستخدم كمولّد تردد رادي في بعض المحطات المترية . لا تعمل هذه الصمامات في نطاق الموجات المكروية لصغر سعاتها الترددية وقد بدأ استخدامها يقل مع مرور الزمن .

- الأدوات مُتقاطعة المجال Crossed Field Devices مثل الماغنترون والمكبر مُتقاطع المجال CFA (أو الأمبليترون Amplitron) والتي تحتاج مجالاً مغنطيسياً في عملها .
- الأدوات خطية الشعاع Linear-Beam Devices مثل الكلايسترون وصمام الموجة المتنقلة أو الراحلة Traveling Wave Tube .
- أدوات الحالة الجامدة Solid State Devices والتي عادة ما يتم استخدامها على شكل مصفوفات من الترانزستور ذي النطاق الترددي الكبير لزيادة القدرة القصوى والاستمرارية .

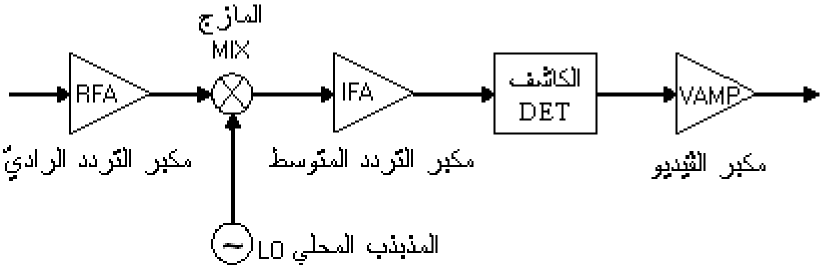
وظيفة معدّل الرادار هي تشكيل إشارة التردد الرادي عالية القدرة المنتجة في مولد التردد الرادي لتخرج على شكل نبضات ضيقة ذات قدرة قصوى كبيرة . ويتمّ تصميم المعدّل بناءً على نوع مولّد التردد الرادي المستخدم وعلى عرض النبضة وشكلها Waveform . من الأدوات المستخدمة في معدل الرادار النبضي صمام الثايراترون Thyratron والصمام الرباعي ومصفوفات الترانزستور الحقلي FET ، والتي يرد ذكرها بالباب السابع من هذا الكتاب إلى جانب الأدوات المستخدمة في توليد التردد الرادي مع شرح مفصل لتركيبها وخواصها .

4-3 مستقبل الرادار

يعمل المستقبل على تكبير ومعالجة الإشارة المستقبلة والتخلص من الضوضاء المصاحبة لها لرفع نسبة الإشارة إلى الضوضاء إلى حد يمكن معه استخدام الإشارة للحصول على معلومات مفيدة وموثوقة عن الأهداف المرصودة .

توجد عدة أنواع من المستقبلات ، من أبسطها المستقبل المباشر المُوالف أو المُنغّم Direct Tuned Receiver والذي يتعامل مع الإشارة المستقبلة عالية التردد من تكبير وترشيح وإزالة تعديل مباشرة دون الحاجة إلى تغيير ترددها ، الأمر الذي يستدعي إعادة ضبط ترددات كل وحداته في كل مرة يراد فيها تغيير تردد الإشارة المرسلة من الرادار .

كما نجد أنّ حساسية المستقبل المباشر منخفضة عند تردد الرادار العالي وذلك لميل معاملات التكبير لمكبرات الإشارة للانخفاض متأثرة بالاستجابة الترددية للأدوات المستخدمة . لزيادة الحساسية ، تم ابتكار مستقبلات إعادة التوليد Super Regenerative Receivers والتي تستخدم التغذية العكسية الموجبة في التكبير ، إلا أنّ ذلك الحل صاحبته تأثيرات سالبة في استقرارية المستقبل .



الشكل 3−3 مستقبل الرادار

تمّ تطوير مستقبلات يتم فيها تغيير تردد الإشارة المستقبلة إلى تردد أقل من ترددها الأصلي مثل المستقبل الهوموداين Homodyne قليل التكلفة والذي يستخدم خرج إشارة المرسل في كشف أو إزالة تعديل الإشارة المستقبلة . يستخدم مثل ذلك المستقبل في بعض مستقبلات الرادار مستمر الموجة CW قليلة الكلفة لقياس سرعة المركبات الأرضية أو ككاشف للحركة Motion Detector .

إلا أنّ أكثر أنواع المستقبلات شيوعاً سواءً في أنظمة الرادار أو الاتصالات هو المستقبل السوبر هيتروداين Super-heterodyne مثل المبين في الشكل 3−3 . يستخدم هذا المستقبل قبل كشف الإشارة مذبذباً محلياً عالي الاستقرارية لتغيير تردد الإشارة المستقبلة إلى تردد ثابت لكل الترددات المحتملة للإشارة المرسلة ، يسمى بالتردد المتوسط Intermediate Frequency .

في أنظمة رادار الاستطلاع ذات المدى الكبير ، يقوم مكبر التردد الرادي RFA بتكبير الإشارة الرادارية الضعيفة المستقبلة حتى يسهل التعامل معها . هذا المكبر عادة ما يتركب من مرحلة واحدة أو اثنتين ، ويستوجب عند الترددات المكروية أن يكون مكبراً قليل الضوضاء LNA لا يتجاوز معامل ضوضائه 4dB .

المازج Mixer عبارة عن دائرة لا خطية تعمل على ضرب الإشارة المستقبلة بعد تكبيرها في المكبر الرادي مع إشارة المذبذب المحلي Local Oscillator . تشتمل إشارة خرج المازج على مركبتين أساسيتين ، إحداهما بتردد يعادل فرق ترددي الإشارتين وأخرى بتردد يعادل مجموعهما ، حيث

$$v_o = A_r \cos 2\pi f_r t \,.\, A_{LO} \cos 2\pi f_{LO} t \qquad 3\text{-}1$$

$$= \tfrac{1}{2} A_r A_{LO} \{\cos 2\pi(f_r - f_{LO})t + \cos 2\pi(f_r + f_{LO})t\} \qquad 3\text{-}2$$

وعند تمرير الإشارة خلال مرشح تمرير حزمة ترددات BPF ذي سعة ترددية كافية لمرور الإشارة دون تشويه وذي تردد أوسط Center Frequency مضبوط على التردد المتوسط IF الذي يعادل

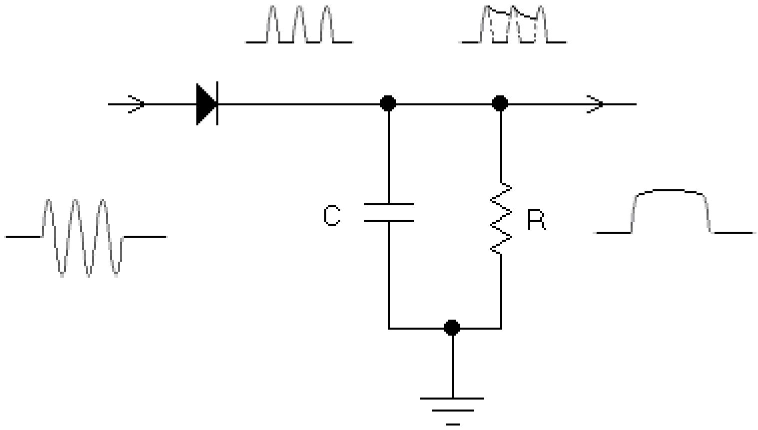
$$IF = f_r - f_{LO} \qquad 3\text{-}3$$

فإننا نتخلص من مركبة مجموع الترددين ونحصل على إشارة التردد المتوسط . يتم تكبير تلك الإشارة في مكبر التردد المتوسط IFA والذي عادة ما يتكون من عدة مراحل متتالية . تعتمد حساسية المستقبل السوبر هيتروداين وبالتالي مدى الرادار بدرجة كبيرة على معامل تكبير مراحل التردد المتوسط .

بالإضافة إلى التكبير ، تُجرى معظم عمليات الترشيح للإشارة بمراحل التردد المتوسط مما يجعلها تؤثر بدرجة كبيرة على اختيارية Selectivity المستقبل . الحساسية والاختيارية هما أهم خواص المستقبلات من بين خواص أخرى نأتي على ذكرها بالتفصيل في الباب الثامن من هذا الكتاب إن شاء الله . كذلك نجد أنّ هنالك عدة تقنيات لمعالجة الإشارة الرادارية Radar Signal Processing تتمّ أيضاً في مراحل التردد المتوسط ويرد تفصيلها في الباب الرابع .

يعمل الكاشف Detector أو مزيل التعديل على استخلاص إشارة الفيديو من إشارة التردد المتوسط . يتكون كاشف الغلاف Envelope Detector من ثنائي ومرشح تمرير ترددات دنيا LPF مشابه لما بالشكل 3–4 أدناه . نبضات الفيديو المكتشفة ذات قطبية أحادية موجبة أو سالبة حسب اتجاه الثنائي . هذه النبضات ليست

مستطيلة الشكل تماماً كما يتوقع بل شبيهة بالنبضات القاوسيّة Gaussian وليس بها حواف حادة وذلك نتيجة للتشويه بسبب الترشيح قبل وبعد الكشف .



الشكل 3-4 كاشف الغلاف

يسمى كاشف الغلاف في أنظمة الموجات المكروية أحياناً بالكاشف الثاني باعتبار أنّ المازج البلوري المستخدم لاستخلاص التردد المتوسط هو الكاشف الأول . توجد أنواع أخرى من مزيلات التعديل المطالي AM غير كاشف الغلاف تستخدم لكشف الإشارات الرادارية ولكنها تختلف عنه في بعض الخصائص أبرزها كاشف الطور المتزامن الذي يرد التفصيل له في الباب الخامس بعون الله .

يعتبر مكبر الفيديو Video Amplifier مرحلة الخرج بالمستقبل ووظيفته تكبير الإشارة المكتشفة إلى مستوى مناسب لإرسالها إلى المبين لعرضها . تمتاز هذه المكبرات بكبر سعتها الترددية والتي تبدأ من نطاق التيار المباشر وتمتد لبضع من الميقا هيرتز وتشبه إلى حد كبير مكبرات الفيديو المستخدمة في جهاز الاستقبال التلفزيوني .

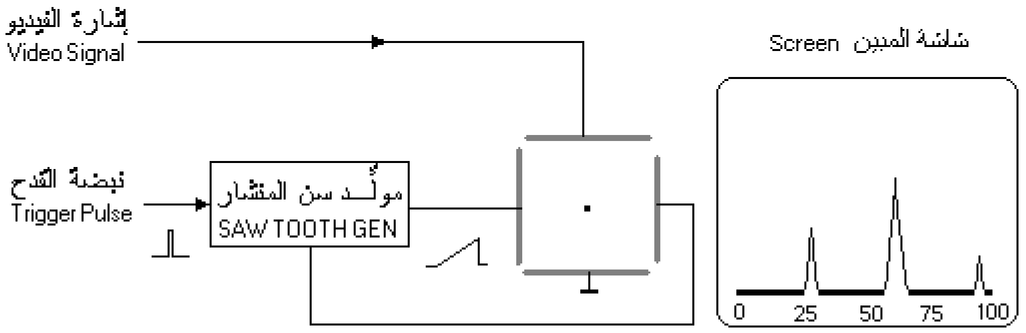
5-3 مبين الرادار

مما سبق نعلم أنّ المبين يستقبل كلاً من إشارة الفيديو من المستقبل ونبضات التزامن من مولّد النبضات ليتمكن من عرض الأهداف على شاشته وتيسير قراءة إحداثياتها . توجد بعض المبينات التي تستقبل بيانات إضافية تحسن من كيفية العرض وتظهر معلومات من مصادر أخرى مستقلة عن الرادار .

توجد عدة أنواع من مبينات الرادار تختلف حسب وظيفة الرادار والغرض من المبين . ولكننا نجد أنّ المبين الأساسي للرادار هو مبين المدى Range Indicator والذي يعرض نبضة الصدى من الهدف في موقع يمكن معه قراءة مدى الهدف من الرادار . إلا أنّ هذا المبين لا يمكِّن إلا من قراءة إحداثي واحد للهدف لا أكثر ، حيث لا ترد إليه أي معلومات عن الاتجاه اللحظي للهوائي .

تركيب مبين المدى شبيه إلى حد كبير بتركيب عارض الإشارات CRO والذي يستخدم أنبوب أشعة المهبط لتوليد شعاع إلكتروني ينطلق من المهبط ليسقط على سطح الشاشة المطلية بمادة فسفورية تتوهج عند نقطة السقوط فتظهر نقطة مضيئة على الشاشة .

يستخدم لوحان متوازيان رأسيان يحصران عنق الشاشة لتحريك الشعاع الإلكتروني أفقياً بتأثير المجال الكهربي الناتج من فرق الجهد بين اللوحين بما يعرف بالانحراف الأفقي Horizontal Deflection والذي يعمل على تحريك النقطة المضيئة بعرض الشاشة . بالمثل يستخدم لوحان متوازيان أفقيان لتوفير الانحراف الرأسي Vertical Deflection لتحريك النقطة المضيئة رأسياً .



الشكل 3−5 مبين المدى

عادة يتمّ استخدام إشارة جهد سن منشار لتوفير الانحراف الأفقي فتتحرك النقطة المضيئة عند وصول نبضة التزامن من أقصى يسار الشاشة بسرعة ثابتة وترجع لدى وصولها أقصى اليمين بسرعة كبيرة إلى اليسار مرة أخرى لتبدأ الحركة من جديد (انظر الشكل 3−5) . تسمى إشارة جهد الانحراف الأفقي هذه بالقاعدة الزمنية Time

Base وذلك لأنها تمثل المحور الزمني لإحداثيات المنحنى الممثل للإشارة . أما إشارة جهد الانحراف الرأسي فتمثل مطال إشارة الفيديو المراد عرضها حيث يتناسب مطال المنحنى المعروض على الشاشة مع الجهد اللحظي لإشارة الفيديو المكتشفة .

نتيجة لذلك تظهر نبضات الصدى من الأهداف بمطالات تعتمد أي منها على القدرة المستقبلة من الهدف المعني ، في حين يبعد موقع أي منها على المحور الزمني من أقصى اليسار بمسافة تتناسب مع مدى الهدف من الرادار . تبعاً للعلاقة المعروفة بين زمن وصول النبضة ومدى الهدف كما في المعادلة 2-1 ، يتم تدريج المحور الزمني بوحدات المسافة بدلاً عن الزمن كما يتضح من الشكل 3−5 .

يستفاد من مبين المدى في القراءة الدقيقة للمدى وقياس مستوى إشارة الصدى لأغراض الضبط والمعايرة . كما يستخدم أيضاً كراسم إشارات Oscilloscope داخل نظام الرادار يساعد في إجراء القياسات للإشارات المختلفة المارة عبر وحداته وضبط نبضات التزامن والعلامات Marks الضوئية المستخدمة في المبينات الأخرى .

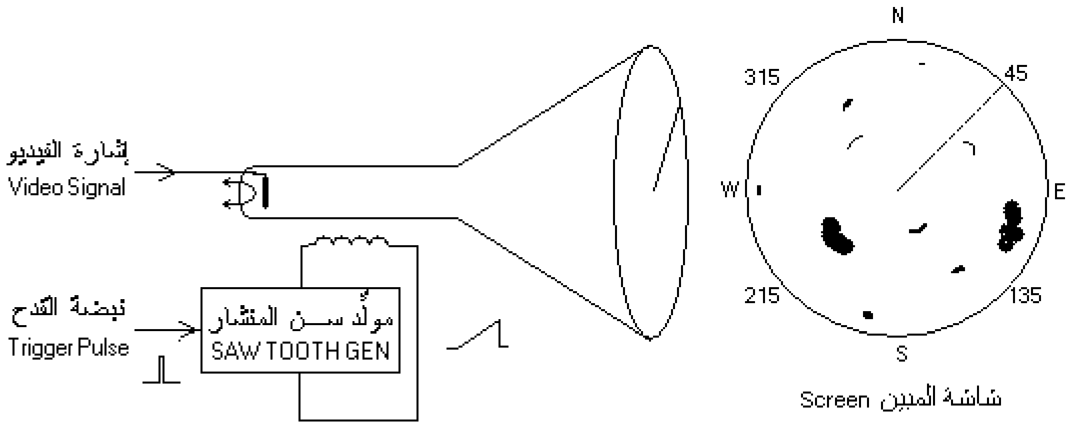
من المبينات شائعة الاستخدام لا سيما في أنظمة الاستطلاع الراداري ، مبين المدى والسمت Plan Position Indicator ويختصر بالأحرف PPI . وهو مبين يمكن معه قراءة إحداثيين للهدف هما المدى والسمت Azimuth أو زاوية الاتجاه Bearing . شاشة المبين دائرية الشكل ويظهر عليها خط نصف قطري مُضيء يبدأ من مركز الشاشة وينتهي عند حافتها يسمى خط المسح Scan Line يدور متزامناً مع الاتجاه اللحظي لحركة دوران هوائي الرادار .

يتركب المبين من أنبوب أشعة المهبط CRT ذي شاشة دائرية ويستخدم ملفاً كهربياً واحداً للانحراف مغنطيسياً بدلاً من ألواح الانحراف الأربعة المستخدمة في مبين المدى . تعمل إشارة تيار سن المنشار والمتزامنة مع نبضات تزامن الرادار كقاعدة زمنية لتحريك النقطة المضيئة من مركز الشاشة إلى حافتها لتشكيل خط المسح . في الطرائق التقليدية يستخدم محرك كهربي صغير متزامناً مع محرك الهوائي لتحريك

ملف الانحراف بصورة دائرية يتحرك تبعاً لها خط المسح ، إلاّ أنه توجد طرائق إلكترونية بحتة تحقق نفس الغرض وبصورة أفضل .

تعمل إشارة الفيديو على تغيير جهد المهبط مما يؤثر في شدة الشعاع الإلكتروني المنبعث من المهبط والذي يشتد بزيادة فرق الجهد بين كل من المهبط والمصعد . نتيجة لذلك تتغير شدة إضاءة النقطة المتحركة على الشاشة حسب مستوى جهد إشارة الفيديو وبالتالي القدرة المنعكسة من الهدف . تسمى عملية التحكم بشدة إضاءة النقطة المضيئة عن طريق التحكم بجهد المهبط بتعديل شدة الإضاءة Intensity Modulation .

على إثر ذلك تظهر الأهداف المكتشفة على طول خط المسح على شكل بقع مضيئة Plots لحظة مرور الهوائي تجاهها ، أي عند تساوي سمت أو زاوية اتجاه أي منها مع زاوية اتجاه الهوائي في تلك اللحظة (انظر الشكل 3−6) .



الشكل 3−6 مبين المدى والسمت

يتم طلاء شاشة المبين بمادة لها المقدرة على الاحتفاظ بالتوهج Persistence لفترة أطول بعد ابتعاد شعاع المسح وبدرجة تتناسب وقوة التوهج وبالتالي وشدة التيار الإلكتروني . لذلك فإنّ آثار الأهداف تبقى ظاهرة على الشاشة لفترة زمنية تمكن من رؤية عدد كبير من بقع الأهداف بزوايا مختلفة في آن واحد . إلاّ أن الأنواع التقليدية من هذا المبين تحتاج إلى إظلام الغرفة للرؤية الواضحة مما يتعب العين مع طول وقت الرصد والمتابعة على الشاشة .

يقاس مدى الهدف من مركز الشاشة بصورة بيانية باستخدام تدريج على الشاشة ويتم تسهيل ذلك باستخدام دوائر متمركزة تسمى دوائر المدى بحيث أنّ وقوع الهدف على محيط إحداها يعني مساواة مداه لنصف قطرها . تستخدم خطوط مارة بمركز الشاشة لتسهيل قياس سمت الأهداف من تدريج موضوع على محيط الشاشة يبدأ عادة من اتجاه الشمال الجغرافي الذي يمثل بالزاوية صفر . يزيد تدريج السمت مع اتجاه عقارب الساعة (اتجاه دوران الهوائي) حيث يتم تمثيل الشرق بالزاوية 90° في حين يمثّل الجنوب بالزاوية 180° كما يظهر بالشكل 3–6 .

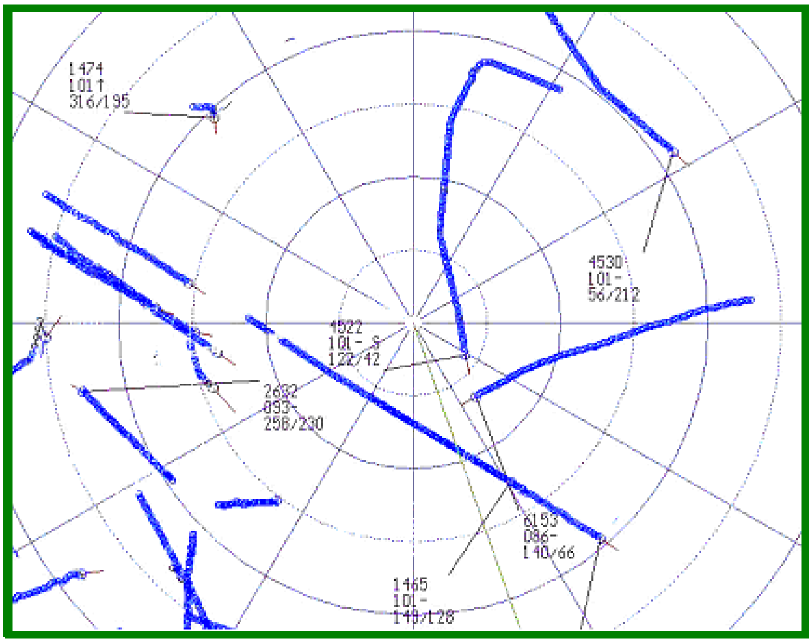
بدلاً من استخدام محرك كهربي لتحريك ملف الانحراف دائرياً ، يُستخدم ملفا انحراف متعامدان أفقي ورأسي لتحريك شعاع المسح [5] . يتمّ ربط مجزئ جهد Potentiometer ذو فرشاتان متعامدتان مع بعضهما إلى عمود دوران الهوائي لجس زاوية اتجاهه . تعطي إحدى الفرشاتين إشارة جهد تتناسب مع جيب زاوية العمود في حين يتناسب جهد الأخرى مع جيب تمام الزاوية . يتمّ تحويل إشارتي الجهد إلى إشارتي تيار ويمرران بملفَي الانحراف المتعامدين فيدور شعاع المسح مع الهوائي .

في بعض الأنظمة يستخدم مجس إندكتوسين Inductocyne بدلاً من مجزئ الجهد المذكور أعلاه ، وهو مولد كهربي ذو وجهين 2-phase به ملفين متعامدين تتولد بهما قوتين دافعتين الفرق في الطور بينهما $\pi/2$. في الباب السادس من هذا الكتاب نتعرض لنوع آخر من المجسات المستخدمة لجس الزاوية ويسمى المضمِّن الضوئي .

تبعاً للتطور في برمجيات الحاسوب وطرائق معالجة البيانات الرادارية ، فقد استبدل مبين المدى والسمت التقليدي بالمبين المركَّب Synthetic Display في معظم أنظمة الاستطلاع الحديثة . هذا المبين لا يتعامل مع إشارات الفيديو مباشرة مثل المبينات التقليدية آنفة الذكر ، بل هو عبارة عن جهاز حاسوب سريع له ذاكرة كبيرة وشاشة عرض ملونّة ويشغّل برامج خاصة تعمل على البيانات الرادارية المستنبطة من الأهداف . يتمّ استخلاص الأهداف بواسطة معالجات رقمية خاصة يأتي الحديث عنها في الباب السادس من هذا الكتاب .

تُعرض الأهداف في المبين المركب بصورة مشابهة لنظيراتها في مبين المدى والسمت التقليدي باعتماد الإحداثيات القطبية للأهداف ولكن بمواصفات أفضل منها بكثير . لا تعرض الأهداف على شكل بقع مضيئة بل تعرض على شكل رموز مصطنعة كالمربع أو النجمة في نفس موقع الهدف مع كتابة معلومات نصيّة إضافية جوار رمز الهدف للتوضيح .

كما يمكن استخدام خريطة كخلفية للشاشة توضَّح عليها المعالم الطبيعية البارزة كالأنهار والجبال ، إلى جانب توضيح الممرات الجوية Corridors المسموح بمرور الطيران عبرها والمناطق العسكرية والصناعية الهامة التي يحظر الطيران فوقها كالسدود والجسور ومحطات توليد الكهرباء . وبما أنّ هذا المبين يستخدم شاشة الحاسوب الرقمية المعتادة ، لا يحتاج عامل الرصد إلى إظلام الغرفة كما في حالة المبين التقليدي .



الشكل 3–7 المبين المركب

أسئلة وتمارين

1- بالرسم وضّح المخطط الصندوقي العام لرادار نبضي مع شرح وظيفة كل وحدة به .

2- رادار تردد تكرار نبضته 300Hz رصد هدف يبعد عنه 600km . إذا كان قطر شاشة مبين المدى والسمت المستخدم 50cm ، أوجد المحل الهندسي لموقع تمثيل الهدف على شاشة المبين .

3- في المثال السابق أوجد موقع تمثيل الهدف على شاشة مبين المدى المستخدم إذا كان عرض شاشته 20cm .

4- اشرح تركيب وطريقة عمل مبين المدى والسمت .

5- رادار تردد إرساله 3GHz وتردده المتوسط 40MHz ، أوجد الترددات المحتملة للمذبذب المحلي عالي الاستقرارية بالمستقبل .

6- عدِّد المكبرات المختلفة بمستقبل الرادار ووضح أي منهم له معامل التكبير الأعلى مع ذكر السبب .

7- اشرح كيفية التحكم في كل من عرض نبضة الرادار المرسلة وفي لحظة إرسالها .

8- وضح على ماذا تعتمد دقة القياس في كل من المدى والزاوية .

9- اشرح دور المزدوج في الرادار النبضي وأثره في حماية المستقبل .

الباب الرابع

معالجة الإشـارات الرادارية

4-1 مقدمة

يعمل مستقبل الرادار كما سبق على تكبير الإشارة الرادارية المستقبلة ضعيفة القدرة إلى درجة تمكِّن من الاستفادة منها لاستخلاص أكبر قدر من المعلومات عن الهدف وبصورة موثوقة لا لبس فيها .

عادة ما تستصحب الإشارة المستقبلة معها إشارات أخرى غير مطلوبة تتسبب في ضياع المعلومات الرادارية وتقلل من مقدرة الرادار على كشف الأهداف ورصدها بما يعرف بالتداخل Interference . وكما سبق في الباب الثاني فإن التداخل بنوعيه المقصود وغير المقصود ، أي التشويش والضوضاء ، يقلل كل من حساسية الرادار ونسبة الإشارة إلى الضوضاء والتي قد تصل قيمتها لأقل من واحد مما يسبب استحالة الكشف الراداري في معظم الأنظمة . لما سبق يعمل المستقبل على رفع نسبة الإشارة إلى الضوضاء قبل الكشف وذلك بواسطة تقنيات معالجة الإشارة Signal Processing المختلفة .

إلى جانب الضوضاء نجد أن الرادار يعاني من الإشارات القادمة من أهداف غير مطلوبة بل وغير مرغوبة لغالبية الأنظمة الرادارية وهي الأهداف الثابتة والبطيئة والتي تعرف اصطلاحاً بالزخم Clutter والتي قد تكون إشاراتها قوية مقارنة بإشارات الأهداف الحقيقية والمطلوبة مما يسبب لبساً في المعلومات الرادارية المستخلصة .

يجب أن تتم معالجة الإشارة المستقبلة بصورة لا تقلل من استقرارية وخطية استجابة المستقبل لمطال الإشارة إذ يجب أن يتناسب فقط مع قدرة الإشارة الملتقطة والتي تعتمد على مدى الهدف ومقطعه الراداري . يعرف المدى الديناميكي Dynamic Range لمستقبل الرادار بالفرق بين مطال أقل إشارة مكتشفة وأعلى مطال ممكن

للإشارة لا يُحدث تشبعاً بدوائر المستقبل . يدل كبر المدى الديناميكي للمستقبل على خطيته في التعامل مع الإشارات المختلفة .

يُعتبر الترشيح من أهم التقنيات المتبعة لمعالجة الإشارات في الضوضاء بالإضافة إلى تكامل الإشارات قبل وبعد الكشف وترشيح النبضات المتزامن . ومن تقنيات تمييز الأهداف وسط الزخم التكبير اللوغريتمي والتفاضل إلى جانب بعض التقنيات التي تخدم الغرضين تعرف بتقنيات تثبيت معدل الإنذارات الكاذبة . كما تستخدم تقنيات معالجة لزيادة المدى الديناميكي للمستقبل أبرزها التكبير اللوغريتمي والتحكم الزمني بمعامل التكبير . في الباب القادم إن شاء الله نتحدث عن إحدى تقنيات معالجة الإشارة الهامة وهي تقنية تمييز الأهداف المتحركة والتي تعمل على رفع نسبة الإشارة إلى الزخم Signal-to-Clutter Ratio .

2-4 ترشيح الإشارات

يعتبر الترشيح الوسيلة الأساسية التي تمكِّن مستقبل الرادار من تمييز الإشارات المطلوبة من بين تلك الإشارات المتداخلة معها وتقاسمها نفس النطاق الترددي . يتم الترشيح باستخدام المرشحات Filters في مختلف مراحل المستقبل ، أو بتصميم دوائر المستقبل نفسها لتكون ذات استجابة ترددية مماثلة لاستجابة المرشحات المرغوبة .

في حال وجود ضوضاء بيضاء White Noise ذات طيف عريض مثل الضوضاء الحرارية فقط دون غيرها ، يمكن استخدام مرشحات تمرير حزمة BPF بسعة ترددية كافية لتمرير الإشارة الرادارية دون تشويه مؤثر . هذا التشويه المؤثر يقصد به التشويه الذي يؤثر في نتيجة الكشف على الإشارة إلى درجة تؤدي إلى خطأ في نتيجته مما ينتج عنه عدم كشف الإشارة أو ظهور أهداف كاذبة أو انخفاض دقة القياس . يتم تصميم المرشح بحيث يساوي تردده الأوسط Center Frequency تردد الرادار بدوائر التردد الرادي ، أو ليساوي التردد المتوسط في دوائر التردد المتوسط والتي يوجد بها المرشحات الأكثر فاعلية بالمستقبل .

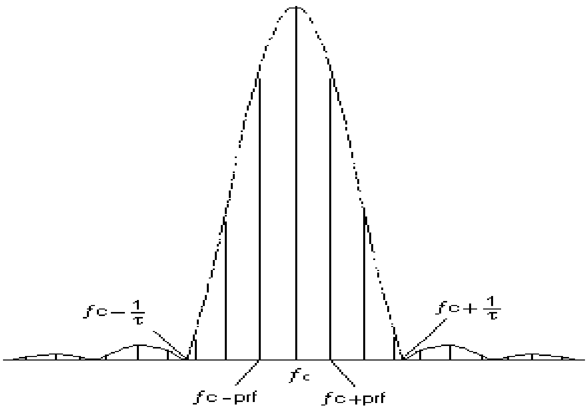
بينما تستخدم دوائر الموجات المكروية وخطوط النقل كمرشحات في مراحل التردد الرادي ، تستخدم الدوائر الكهربية الخاملة المكوّنة من الملفات والمكثفات لتحقيق مرشحات الإشارة في مراحل التردد المتوسط . يعتمد المرشح الأخير في عمله على الرنين Resonance الذي ينشأ من وجود سعات ومحاثات بالدائرة ويتم تحديد تردده الأوسط تبعاً لقيم كل من الملفات والمكثفات المستخدمة . السعة الترددية Bandwidth للمرشح هي الفرق بين ترددي قطع المرشح وتعتمد على معامل جودة Quality Factor دائرة الرنين والمرتبطة بمقاومة أسلاك الملفات المستخدمة في الدائرة .

يمكن استخدام بلورة الكوارتز في تركيب المرشح في مراحل التردد المتوسط لاحتواء دائرتها المكافئة على محاثة وسعة توفر الرنين وتقلل من القطع المستخدمة للحصول على نفس معامل الجودة . كما تستخدم أدوات الموجات الصوتية السطحية SAW في بعض المستقبلات كأدوات خاملة للترشيح . يمكن في مراحل التردد المتوسط دون مراحل التردد الرادي استخدام المرشحات الفعالة Active Filters المصممة بواسطة المكبرات التشغيلية المكونة من أشباه الموصلات ، والتي تمتاز بعدم الحاجة إلى استخدام الملفات في تركيبها . كذلك يزداد في تلك المراحل استخدام المرشحات الرقمية Digital Filters ، لا سيما مع التطور المطرِّد في مجالات معالجة الإشارة رقمياً وتوفر المحولات من تماثلي إلى رقمي ADC بالسرعات المطلوبة للعمل .

كما يتضح من شكل طيف قدرة الإشارة الرادارية المبين في الشكل 4-1 أدناه ، نجد أنّ معظم طاقة النبضة تتركز بالفص الأساسي Main Lobe دون الفصوص الجانبية ، وأنّ أقرب قيم صفرية لغلاف الإشارة والموضح بالخط المتقطع تقع عند ترددين يبعد أي منهما عن تردد الرادار أو التردد المتوسط بمقدار مقلوب عرض النبضة الرادارية . يقترح نورث North مقلوب عرض النبضة كقيمة مُثلى للسعة الترددية لمرشحات الإشارة الرادارية بدون حدوث تشويه مؤثر بالإشارة مع وجود الترشيح المناسب للضوضاء .

لإيجاد نسبة الإشارة للضوضاء القصوى في خرج المرشح بافتراض وجود الضوضاء الحرارية فقط ، نستخدم المعادلة

$$SNR = P_r / k T_o B \quad 4\text{-}1$$



الشكل 4−1 قدرة الإشارة الرادارية

وبالتعويض بالسعة الترددية المقترحة أعلاه للمرشح نحصل على

$$SNR = P_r \tau / k T_o \quad 4\text{-}2$$

وبدلالة طاقة النبضة من المعادلة 2-25 ، تُعطى نسبة الإشارة إلى الضوضاء القصوى بعد الترشيح بالعلاقة التالية

$$SNR = E_r / k T_o = E / N_o \quad 4\text{-}3$$

حيث N_o كثافة الضوضاء Noise Density والتي تعادل القدرة المتوسطة للضوضاء الحرارية لكل وحدة ترددات ، W / Hz . تعرف النسبة أعلاه بمعامل الاكتشافية [2] Detectability Factor وهو أقل نسبة إشارة إلى الضوضاء في خرج مرشح متوافق مع الإشارة .

3-4 الترشيح التوافقي

إذا ما كانت الإشارة المرسلة من الرادار يُعبَّر عنها في النطاق الزمني بالدالة s(t) ، فإنّ متحول فورير للدالة والذي يمثل طيف الإشارة يعادل

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\, e^{-j2\pi f t}\, dt \quad 4\text{-}4$$

وإذا ما كانت دالة نقل المستقبل أو بعض وحداته السابقة للكاشف هي $H(f)$ ، فإنّ كل من طيف ودالة إشارة الخرج قبل الكشف على الإشارة يعطيان بالمعادلتين

$$X(f) = H(f)\, S(f) \qquad 4\text{-}5$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)\, e^{j2\pi f t}\, df = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)\, S(f)\, e^{j2\pi f t}\, df \qquad 4\text{-}6$$

يمكن التعبير عن نسبة الإشارة إلى الضوضاء عند خرج المستقبل بدلالة القيمة العظمى لجهد الإشارة $x(t)$ والتي تقع عند $t = t_o$ ، حيث $0 < t_o < \tau$ ، والتي تتم نمذجة Sampling الإشارة عندها في المستقبل ، كما يلي

$$SNR = |\, x(t_o)\, |^2 / N \qquad 4\text{-}7$$

حيث N تمثل القدرة المتوسطة للضوضاء عند خرج المستقبل والتي تعادل

$$N = \int_{-\infty}^{\infty} (N_o/2)\, |H(f)|^2\, df \qquad 4\text{-}8$$

حيث $N_o/2$ كثافة الضوضاء عند مدخل المرشح . القيمة مقسومة على اثنين نسبة لاستخدام كل من الترددات الموجبة والسالبة في تحليل الإشارات بينما كان التعريف السابق لكثافة الضوضاء يعتمد الترددات الموجبة فقط . بالتعويض في المعادلات أعلاه ، نجد أنّ نسبة الإشارة إلى الضوضاء في الخرج تعادل

$$SNR = \left|\int_{-\infty}^{\infty} H(f) S(f)\, e^{j2\pi f t_o}\, df\right|^2 / \; N_o/2 \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2\, df \qquad 4\text{-}9$$

من الرياضيات نجد أن متباينة شوارتز Schwartz Inequality تفيد بأنّ مربع القيمة المطلقة لتكامل حاصل ضرب دالتين يقل عن أو يساوي حاصل ضرب تكاملي مربعي القيمة المطلقة لكل دالة ، أي أنّ

$$\left|\int_{-\infty}^{\infty} U(f) V(f)\, df\right|^2 \le \int_{-\infty}^{\infty} |U(f)|^2\, df \int_{-\infty}^{\infty} |V(f)|^2\, df \qquad 4\text{-}10$$

حيث U ، V تمثلان أي دالتين في المتغير المستقل f . كذلك نجد من تقنيات تحليل الإشارات والنظم بأنّ نظرية بارسفال Parseval Theorem تعبر عن طاقة الإشارة في كل من النطاقين الزمني والترددي بالمعادلة

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t)\, dt = \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2\, df \qquad 4\text{-}11$$

بتعويض الدالة $U(f) = H(f)$ وتعويض الدالة $V(f) = S(f)\, e^{j2\pi f t_o}$ في متباينة شوارتز نجد أنّ

$$|\int_{-\infty}^{\infty} H(f) S(f) e^{j2\pi f t_o} df|^2 \leq \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df \int_{-\infty}^{\infty} |S(f) e^{j2\pi f t_o}|^2 df \quad 4\text{-}12$$

فتتحول المعادلة 4-9 إلى المتباينة التالية

$$SNR \leq 2/N_o \, |\int_{-\infty}^{\infty} S(f)\, e^{j2\pi f\, t_o}\, df|^2 \quad 4\text{-}13$$

$$SNR \leq 2\, |s(t_o)|^2 / N_o \quad 4\text{-}14$$

حسب نظرية بارسفال . لذا فإنّ القيمة العظمى لنسبة الإشارة إلى الضوضاء في خرج المستقبل هي

$$SNR_{max} = 2\, |s(t_o)|^2 / N_o \quad 4\text{-}15$$

تتحقق القيمة العظمى أعلاه في حالة التساوي بالمتباينة 4-12 ، أي عندما توجد العلاقة التالية بين كل من دالة النقل وطيف إشارة دخل المستقبل

$$H(f) = S^*(f)\, e^{-j2\pi f\, t_o} \quad 4\text{-}16$$

أو بصورة عامة عندما

$$H(f) = K\, S^*(f)\, e^{-j2\pi f\, t_o} \quad 4\text{-}17$$

حيث t_o التأخير الذي يصبح عنده جهد إشارة الخرج عند أقصى قيمة له ، K ثابت يعادل معامل تكبير أو توهين المرشح ، $S^*(f)$ مرافق طيف إشارة الدخل s(t) . يُعرف المرشح ذو دالة النقل المبينة في المعادلة أعلاه بمرشح متوافق Matched Filter مع الإشارة $S(f)$ ، أي مع شكل الإشارة Waveform بغض النظر عن مطالها أو قدرتها .

للحصول على أفضل نتيجة كشف للإشارة الرادارية وسط الضوضاء والتداخل ، فإنه ليس المطلوب هو محافظة الإشارة على شكلها بعد الترشيح المتوافق قبل الكشف بقدر ما المطلوب هو الحصول على أكبر نسبة إشارة إلى الضوضاء ممكنة في خرج المرشح .

4-4 الرابط كمرشح متوافق

يمكن إيجاد إشارة خرج أي مرشح في النطاق الزمني بإجراء التفاف Convolution للإشارة المستقبلة عند دخل المرشح $s_r(t)$ مع استجابة النُبيضة Impulse Response لذلك المرشح h(t) باستخدام العلاقة

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_r(\lambda)\, h(t - \lambda)\, d\lambda \qquad 4\text{-}18$$

حيث λ متغير وهمي Dummy Variable . استجابة النُبيضة لأي مرشح هي متحول فورير العكسي لدالة نقله $H(f)$ وتعطى بالعلاقة

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)\, e^{j2\pi f t}\, df \qquad 4\text{-}19$$

من المعادلة 4-16 نجد أنّ دالة نقل المرشح المتوافق مع الإشارة المرسلة s(t) تعادل مرافق طيف الإشارة $S^*(f)$ مع تأخير زمني t_o ، وعليه فإنّ استجابة ذلك المرشح للنبيضة تعادل

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S^*(f)\, e^{j2\pi f(t - t_o)}\, df = s(t_o - t) \qquad 4\text{-}20$$

حيث $s(t_o - t) = s^*(t - t_o)$. وباستخدام الالتفاف المبيّن في المعادلة 4-18 ، نجد أنّ أي إشارة خرج لذلك المرشح يمكن إيجادها كالتالي

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_r(\lambda)\, s(t_o - t - \lambda)\, d\lambda \qquad 4\text{-}21$$

يمكن تعريف دالة الارتباط التقاطعي Cross Correlation Function بين أي إشارتين y(t) ، z(t) بالعلاقة الرياضية التالية

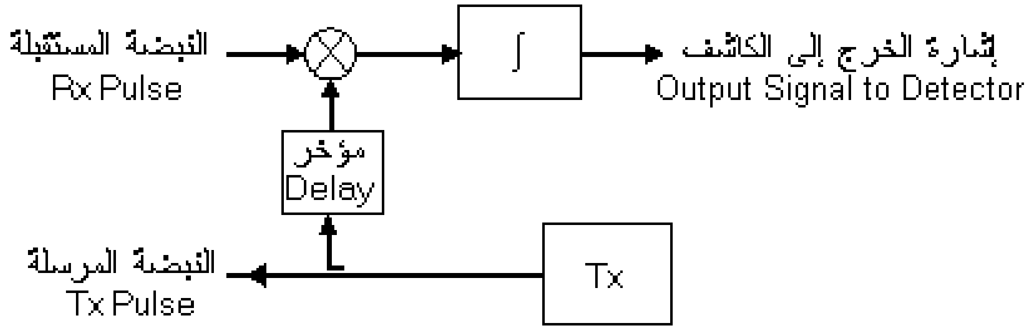
$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\lambda)\, z(t + \lambda)\, d\lambda \qquad 4\text{-}22$$

حيث λ لها نفس الإشارة في الدالتَين . بالتالي يمكننا كتابة المعادلة 4-21 كما يلي

$$x(t) = R(t - t_o) \qquad 4\text{-}23$$

يتضح من المعادلة أعلاه أن خرج المرشح المتوافق مع الإشارة المرسلة يعادل دالة الارتباط التقاطعي للإشارة المستقبلة مع الإشارة المرسلة (أو نسخة منها) مع تأخير زمني . وعليه إذا لم تصاحب الإشارة المستقبلة ضوضاء ، فإننا نحصل على إشارة

تتناسب مع دالة الارتباط الذاتي Auto Correlation Function للإشارة المرسلة في خرج المرشح المتوافق . مما سبق يتضح أنه يمكن تصميم المرشح أو المستقبل على شكل كاشف الارتباط Correlator ليحقق نفس وظيفة المرشح المتوافق كما بالشكل 4−2 أدناه .



الشكل 4−2 كاشف الارتباط

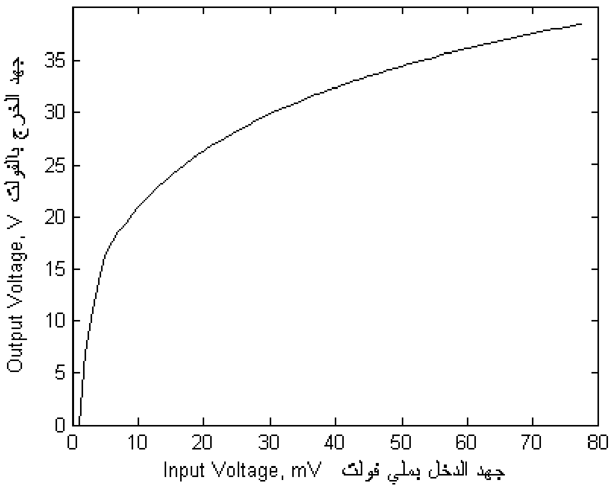
يستخدم الترشيح التوافقي وكشف الارتباط لأغراض أخرى غير مكافحة الضوضاء وذلك للحصول على خواص أفضل للإشارة . يتّم تصميم شكل الموجة المستخدمة للإشارة الرادارية المرسلة بخلاف الشكل الموجي المعتاد ذي الطور الثابت حيث يمكن تعديل ترددها أو طورها اعتماداً على نسق محدد يسمح بمعالجتها عند استقبالها بواسطة مرشح متوافق معها لتحقيق الغرض المنشود ، كما يحدث في حالة ضغط النبضة على سبيل المثال .

4-5 التكبير اللوغريتمي والتفاضل

توجد بعض الطرائق الشائعة لمعالجة الإشارات الرادارية القادمة من أهداف وسط زخم ذي معدل تغير منخفض نسبياً مثل الذي ينشأ من الغيوم وحركة أمواج البحر وسلاسل الجبال الخالية من القمم الحادة .

من أبرز طرائق المعالجة تلك التكبير اللوغريتمي والتفاضل Logarithmic Amplification and Differentiation لإشارة الفيديو بعد الكشف . المكبر اللوغريتمي مكبر لا خطّي يتناسب جهد إشارة خرجه مع لوغريتم جهد إشارة دخله

بحيث تنال الإشارات ذات الجهود المنخفضة حظاً في التكبير أكبر مما للإشارات عالية الجهد كما بالشكل 4-3 أدناه .



الشكل 4-3 استجابة المكبر اللوغريتمي

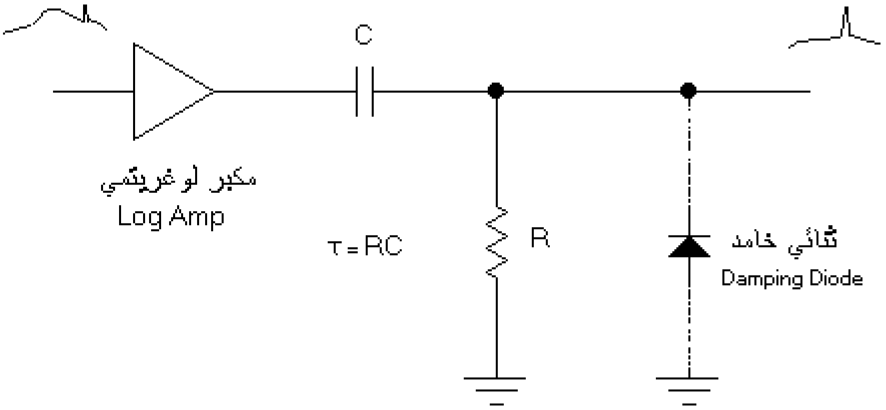
يتم تمرير إشارة الفيديو المكتشفة عبر مكبر لوغريتمي لرفع نسبة جهود إشارات الأهداف الضعيفة مقارنة بإشارات الزخم القوية ، ومن ثم تمرَّر إشارة الخرج عبر مفاضل مكون من دائرة ذات ثابت زمني قصير[1] Short Time Constant STC ، أو ذات ثابت زمني سريع Fast Time Constant FTC كما في بعض المراجع [4] . يمكن تحقيق هذه المعالجة بدائرة بسيطة تتركب من مقاومة ومكثف على شكل مرشح لتمرير الترددات العليا HPF كما بالشكل 4-4 أدناه . حتى تتم حماية مراحل الفيديو اللاحقة من الإشارات الخاطفة Spikes عالية الجهد والتي قد تنتج في خرج المفاضل ، عادة ما نلجأ لاستخدام ثنائي موصول على التوازي مع خرج الدائرة وذلك لإخماد جهود تلك الإشارات .

نتيجة للتكبير اللوغريتمي والمتبوع بالتفاضل ، يتمّ تحسين الإشارات الناتجة عن الأهداف النقطية Point Targets ذات المقاطع الرادارية الصغيرة والتي يمكن تحديد مواقعها بنقاط على شاشة الرادار ، بينما يقل أثر الإشارات الناتجة من الأهداف الموزعة Distributed Targets والتي في معظمها زخم غير مرغوب فيه . تعتبر طريقة المعالجة هذه ذات مردود أكبر مع الأهداف المرئية من بين الزخم -Super Clutter Visible كما تظهر في الشكل 4-4 ، إلا أنها تقل فاعليتها مع الأهداف

المطموسة في الزخم أو المرئية دون الزخم Sub-Clutter Visible والتي تحتاج إلى معالجات أخرى لتحسين إشاراتها مثل تمييز الأهداف المتحركة الذي يرد تفصيله في الباب القادم إن شاء الله .

إلى جانب عملها في تحسين مستوى الإشارات الضعيفة بالنسبة إلى الإشارات القوية لإظهار الأهداف وسط الزخم ، يعتبر استخدام المكبرات اللوغريتمية في مستقبل الرادار من الوسائل الهامة في زيادة المدى الديناميكي للمستقبل والذي ورد ذكره في مقدمة هذا الباب .

في أيامنا هذه كثيراً ما تستخدم المعالجة الرقمية للإشارات DSP بدلاً من استخدام المعالجة بالوسائل التماثلية وذلك للحصول على استقرارية أكبر ومرونة في التصميم . بعد إجراء تحويل الإشارة التماثلية إلى رقمية بواسطة محوِّل سريع وبعدد كافئ من الأرقام ، يتم تحويل مقدار الإشارة إلى القيمة اللوغريتمية المقابلة له باستخدام جدول بحث Look-up Table مخزون في ذاكرة للقراءة فقط ROMوذلك لزيادة سرعة المعالجة ، ثم يجري بعد ذلك التفاضل بطريقة رقمية .



الشكل 4-4 التكبير اللوغريتمي والتفاضل

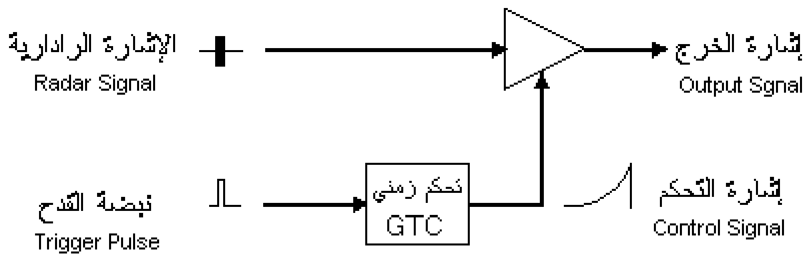
6-4 التحكم الزمني بالتكبير

تستخدم المستقبلات في أنظمة الاتصالات التماثلية ما يعرف بدوائر التحكم الآلي بالتكبير Automatic Gain Control AGC لزيادة مداها الديناميكي . تعمل تلك

الدوائر على تقليل معامل تكبير مراحل التردد المتوسط بالمستقبل في حال ارتفاع جهد إشارة الخرج بعد إزالة التعديل أو الكشف على الإشارة ، حيث تمثل المكبرات مع دائرة التحكم الآلي بالتكبير حلقة تحكم مغلقة ذات تغذية عكسية سالبة .

نظام التحكم الآلي بالتكبير ذو استجابة ملائمة للإشارات المستمرة ذات معدل التغير المنخفض كالصوت أو الصورة ، إلاّ أننا نجدها غير مواكبة للإشارات الرادارية ذات الطابع النبضي سريع التغير . رغماً عن ذلك نجد أنّ هنالك بعض مستقبلات الرادار التي تستخدم ما تعرف بدوائر التحكم الآلي اللحظي بالتكبير [4] IAGC والتي تمتاز باستجابة أسرع من دوائر AGC التقليدية .

تبعاً لمعادلة الرادار في الباب الثاني ، تنعكس من الأهداف القريبة من الرادار إشارات أقوى مما تعكسه الأهداف البعيدة مع اعتبار تقارب المقاطع الرادارية للأهداف . وبما أن مدى الهدف يتناسب مع زمن تأخير النبضة المستقبلة ، يمكن التحكم في معامل تكبير المكبرات بالمستقبل ليتم تكبير الأهداف البعيدة بمعدل أكبر من الأهداف القريبة . تسمى هذه الطريقة بالتحكم الزمني بالتكبير [8] Gain Time Control GTC ، أو التحكم الزمني بالحساسية Sensitivity Time Control كما في بعض المراجع [2،4] ، وتستخدم لزيادة المدى الديناميكي لمستقبل الرادار ولحمايته من الانعكاسات القوية من الأجسام القريبة جداً من هوائي الرادار .



الشكل 4–5 التحكم الزمني بالتكبير

الشكل 4–5 أدناه يبيِّن كيفية التحكم الزمني بالتكبير في الرادار حيث يتمّ توليد إشارة التحكم متزامنةً مع نبضات التزامن الأساسية بالرادار والتي تحدد المدى صفر

للرادار ، وبحيث تتناسب مع R^n لقيم n بين اثنين وأربعة [4] لتعويض التوهين الناشئ من زيادة المدى .

7-4 تكامل نبضات الرادار

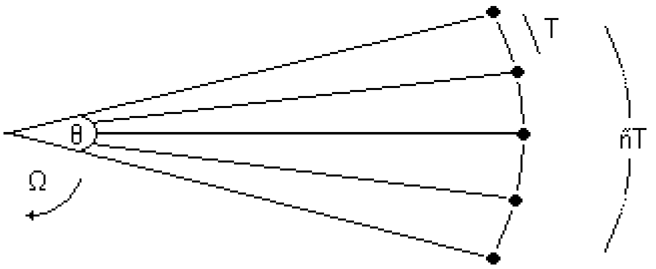
عادة ما يستقبل الرادار عدة نبضات صدى متتالية من نفس الهدف خلال تواجده داخل شعاع الهوائي بحيث تتجمع طاقتها لتشكل نبضة فيديو أقوى يزداد مطالها على مبيِّن المدى ويزداد توهجها على مبين المدى والسمت .

يعتبر تجميع الطاقة هذا تكاملاً للإشارة المستقبلة حيث أنه تجميع طوري Phasor Sum يعتمد على كل من مطال وطور الإشارة اللحظي . بما أن النبضات القادمة من نفس الهدف مترابطة Correlated بخلاف الضوضاء التي تميل إلى العشوائية ، فإنّ تكامل النبضات يرفع من نسبة الإشارة إلى الضوضاء إلى درجة كبيرة .

يحتاج تكامل النبضات الرادارية المستقبلة إلى توفر وسيلة من وسائل تخزين وحفظ الطاقة . من أشكال وسائل الحفظ تلك طلاء شاشة مبيِّن المدى والسمت بالمادة الفسفورية والتي تحتفظ بتوهج البقع المضيئة لفترة من الزمن بعد مرور شعاع المسح . كذلك من أشكالها استجابة كل من عين ودماغ عامل الرصد حيث يحتفظ الإنسان بالصورة التي لمحها لفترة من الزمن في ذاكرته .

لتحسين الكشف ، يتمّ رفع نسبة الإشارة إلى الضوضاء قبل إجراء الكشف بما يعرف بالتكامل قبل الكشف Pre-detection Integration والذي يعتبر تكاملاً من النوع المتزامن Coherent لاعتماده على طور الإشارة . بصورة عامة يمكن اعتبار الترشيح المتوافق والترابط من أشكال التكامل المتزامن قبل الكشف .

يتم التكامل بعد الكشف Post-detection Integration في معظم المستقبلات وذلك لسهولة تحقيقه عملياً ، إلا أنّه يعتبر أقل كفاءة من التكامل قبل الكشف وذلك لكونه تكاملاً غير متزامن Non-coherent لاختفاء معلومة الطور من الإشارة بعد إجراء الكشف .



الشكل 4–6 النبضات من الهدف أثناء دوران الهوائي

بعد التكامل قبل الكشف ، تتناسب نسبة الإشارة إلى الضوضاء ، وبالتالي معامل الاكتشافية ، مع عدد النبضات المُكامَلة ñ ونسبة الإشارة إلى الضوضاء لنبضة مستقبلة واحدة SNR إذ تعادل

$$SNR_{int} = \tilde{n}\ SNR \qquad 4\text{-}24$$

تقل نسبة الإشارة إلى الضوضاء SNR_{int} المبينة في المعادلة أعلاه في حال إجراء التكامل بعد الكشف لعدم خطية الكاشف والتي ينتج عنها تحويل بعض طاقة الإشارة إلى ضوضاء .

أثناء مسح الهوائي لمجال الرادار ، يظلّ هدف نقَطي داخل شعاع الرادار لفترة تعادل ñT حيث ñ عدد النبضات القادمة من الهدف من لحظة دخوله الشعاع إلى لحظة خروجه منه ، والمقدار T هو فترة تكرار نبضة الرادار (انظر الشكل 4–6 أعلاه) . ترتبط السرعة الزاوية Angular Speed لدوران الهوائي Ω بزاوية شعاع الهوائي Beamwidth والتي يرمز إليها θ_B بالعلاقة التالية

$$\Omega = \theta_B / \tilde{n}T \qquad 4\text{-}25$$

لذا فإنّ عدد النبضات القادمة من الهدف خلال تواجده بالشعاع تعادل

$$\tilde{n} = \theta_B / \Omega T \qquad 4\text{-}26$$

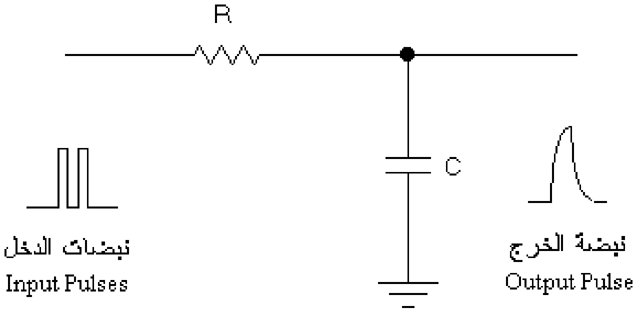
$$\tilde{n} = \theta_B\ PRF / \Omega \qquad 4\text{-}27$$

حيث Ω بالدرجات في الثانية . زمن الدورة الكاملة للهوائي يعادل 360/Ω ثانية والتي تعادل 6/Ω دقيقة ، وبالتعويض في المعادلة أعلاه نحصل على عدد النبضات بدلالة معدل المسح Scan Rate ، والذي يعادل عدد دورات الهوائي في الدقيقة

الواحدة Revolutions Per Minute وبدلالة زاوية الشعاع بالدرجات ، فإنّ عدد النبضات يعادل $N = \frac{\theta_B PRF}{6RPM}$

$$\tilde{n} = \theta_B \, PRF / 6 \, RPM \qquad 4\text{-}28$$

تكامل النبضات بعد الكشف يزيد من عرض النبضة مما قد يؤثر في دقة قياس المدى حيث يجب أخذ التوقيت الأمثل لأخذ العينة للقياس عند القيمة العظمى $x(t_o)$ لتقليل نسبة الخطأ في تحديد مدى الهدف . الشكل 4-7 أدناه يوضح استخدام مرشح ترددات دنيا بسيط كمكامل لنبضات الرادار بعد الكشف ويوضح أثره في تقليل كل من التمييز والدقة في قياس المدى .



الشكل 4-7 تكامل النبضات بعد الكشف

4-8 ترشيح النبضات المتزامن

كما سبق في سياق الحديث عن تكامل نبضات الرادار ، فإن النبضات القادمة من نفس الهدف تكون مترابطة بحيث أنه لا يحدث تغير كبير في مطال أو طور نبضة عن سابقتها أو لاحقتها مقارنة بالضوضاء ذات التغيرات العشوائية .

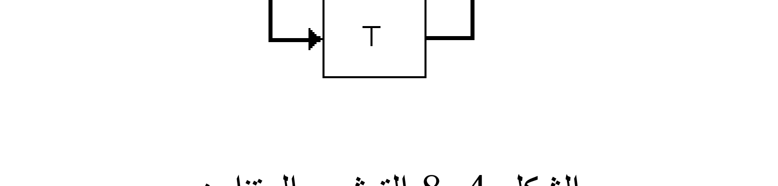
يأتي ترابط نبضات الصدى القادمة من نفس الهدف بسبب انخفاض معدل تغير مدى الهدف أو سرعته النسبية مع الرادار مقارنة بتردد تكرار النبضة . ترتبط القدرة المستقبلة وبالتالي مطال النبضة مع المدى بالمعادلة 7-2 ، في حين يرتبط الطور مع المدى بالمعادلة 7-5 .

بالرغم من استخدام المرشحات ومختلف طرائق المعالجة المتبعة لتقليل أثر التداخل والضوضاء قبل الكشف ، قد تنتج في خرج الكاشف نبضات تمثل أهدافاً زائفة أو ما تعرف اصطلاحاً بالإنذارات الكاذبة False Alarms . لعدم ترابط تلك النبضات في

المدى نجدها ذات ترددات تختلف عن تردد تكرار النبضة وغير متزامنة مع النبضات المرسلة من الرادار مما ينتج عنه تغيير في موقع الهدف الزائف بصورة شبه مستمرة . كذلك يمكن أن يتمّ استقبال نبضات غير متزامنة مرسلة من رادار آخر بصورة مباشرة أو بعد انعكاسها من أهداف موجودة داخل مجالي عمل متقاطعين لرادارين متجاورين .

للتخلص من النبضات غير المتزامنة ، يستخدم نوع من الترشيح يعرف بترشيح النبضات المتزامن Synchronous Pulse Filtering الذي يتم بعد الكشف عن الإشارة . في أبسط صوره الرقمية ، يحتوي المرشح على مؤخر وبوابة المنطق AND لتأخير النبضة المكتشفة الثنائية بمقدار فترة تكرار النبضة ومقارنتها مع النبضة الحالية لإعطاء قيمة ثنائية تؤكد تزامن النبضتين من عدمه كما في الشكل 4−8 أدناه .
في حالة استخدام إشارة فيديو ذات مطال متغير يمكن استخدام بوابة تطابق Coincidence تماثلية تسمح بمرور نبضات الفيديو المتطابقة زمنياً فقط وتمنع مرور غيرها . لاحظ أنّه إذا ما قمنا في الشكل 4−8 باستبدال البوابة بجامع إشارات فسوف نحصل على مكامل للنبضات وليس مرشحاً متزامناً .

كما أنّ استبدال البوابة أعلاه بطارح ، يوفر مرشحاً بسيطاً للأهداف الثابتة نتيجة لعدم تغير مداها بين نبضة وأخرى . هذه الطريقة في الترشيح تشبه إلى حد ما تمييز الأهداف المتحركة MTI المفصل في الباب القادم ، ويمكن تسميته بترشيح MTI غير المتزامن نسبة لعدم تزامن طور الإشارة المستقبلة مع طور الإشارة المرسلة ، ولهذا السبب فهو غير محبذ للاستخدام .



الشكل 4−8 الترشيح المتزامن

4-9 كشف الإشارات

يستخدم مصطلح الكشف Detection في أدبيات الرادار للدلالة على عدد من مراحل معالجة الإشارة والتي قد تختلف عن بعضها تماماً من حيث الغرض من المعالجة وطبيعة الإشارة الرادارية التي تجري عليها المعالجة .

نجد أن مازج الإشارات المستخدم لتغيير تردد الإشارة المستقبلة للتردد المتوسط يسمى أحياناً بالكاشف الأول لا سيّما في الأنظمة المكروية التي تستخدم مازج بلّورة موجود داخل دليل موجة من نوع Magic-T . يقوم هذا الكاشف بالتقاط أو كشف إشارة فرق ترددي كل من الإشارة المستقبلة وإشارة المذبذب المحلي .

كما نجد أن الكاشف غالباً ما يقصد به مزيل التعديل المستخدم لإزالة تعديل إشارة التردد المتوسط والذي يسمى أيضاً بالكاشف الثاني . يقوم هذا الكاشف باستخلاص إشارة الفيديو من إشارة التردد المتوسط اعتماداً على مطال غلافها أو طورها والكشف عن وجود النبضات التي تدل على وجود أهداف داخل مجال الرادار .

وبما أن ليس كل نبضات الفيديو ناشئة عن أهداف حقيقية بل يمكن أن تنتج من أثر الضوضاء أو أثر الزخم ، فإننا نحتاج إلى وسائل لمعالجة الإشارة يمكنها اكتشاف نبضات الأهداف من غيرها بناءً على قواعد وقياسات معينة . تعتمد عملية الكشف عن الأهداف وسط الضوضاء والزخم بعد المعالجة بصورة أساسية على تحديد مستوى للكشف Threshold of Detection والذي تعتبر مستويات الإشارة الأعلى منه ناتجة عن أهداف صحيحة في حين تعتبر ما دونه ضوضاء وزخم .

تعتمد طبيعة مستوى الكشف على القاعدة المستخدمة لإجرائه وعلى طبيعة إشارة الفيديو ، إذ يمكن أن يكون جهداً كهربياً يقارن به مطال الإشارة أو مستوى قدرة أو طاقة النبضة أو أن يكون عدد النبضات القادمة من الهدف . يمكن أن يتم تحقيق الكاشف بدوائر تماثلية أو رقمية أو باستخدام معالجات إشارة رقمية فائقة السرعة .

كما سبق نعلم أن الثنائيات Diodes تستخدم في إزالة تعديل الإشارة الرادارية بواسطة كاشف الغلاف لتقويم الإشارة قبل ترشيحها بواسطة مرشح LPF . للثنائي خواص تربط كل من جهدَي إشارة خرجه وإشارة دخله تعرف بقانون الكاشف[1]

والذي يعطي تقديراً لخواص الكاشف مثل الكاشف الخطي والذي Detector Law يتناسب فيه جهدا الإشارتين ، وقانون التربيع Square Law والذي يتناسب فيه جهد الخرج مع مربع جهد الدخل الصغير نسبياً .

10-4 تثبيت معدل الإنذارات الكاذبة

لزيادة حساسية المستقبل وبالتالي رفع معدل كشف الأهداف ، عادة ما يتم اختيار مستوى الكشف بحيث يزيد قليلاً عن المستوى المتوسط للضوضاء باعتبار أن نسبة الإشارة إلى الضوضاء كبيرة لا سيما المحسوبة للضوضاء المنتجة داخل النظام نفسه System Noise .

إلا أنّ الرادار قد يستقبل من الخارج إشارات متداخلة تتعدى مستوى الكشف وتصل إلى المبين كإنذارات كاذبة يمكن أن يزيد عددها ليغطي جزءاً كبيراً من شاشة المبين ويشبع الذاكرة بالدوائر الرقمية المستخدمة ويقلل بالتالي من معدل تدفق المعلومات عبر قنوات الاتصال .

إذا كان التغير في معدل الإنذارات الكاذبة False Alarm Rate FAR بطيئاً ومتدرجاً ، فإنّ عامل الرصد الجالس أمام المبين يمكنه ضبط حساسية كل من المستقبل والمبيّن بصورة يدويّة عن طريق أدوات تحكم بلوحة المفاتيح . إلا أن التحكم اليدوي بطئ جداً خاصة في حال التشويش المتعمد والزخم غير المستقر إضافة لقلة الدقة في تحديد مستوى الكشف الأمثل .

تعمل بعض طرائق معالجة الإشارة على تثبيت معدل الإنذارات الكاذبة Constant FAR CFAR بصورة آلية دون التقليل من حساسية الرادار تجاه إشارات الأهداف الضعيفة كما يتضح من الشكل 4−10 أدناه . تعرف بعض طرائق معالجة CFAR في بعض المراجع بتقنية مستوى الكشف المتكيّف [4،5] Adaptive Thresholding .

الشكل 4−10 مستوى الكشف المتكيف

من الشائع في معالجة الإشارات الرادارية أن يتمّ تقسيم المدى الأقصى للرادار إلى خلايا صغيرة امتداد الخلية الواحدة منها يعادل التمييز في المدى وتعرف بخلايا المدى Range Cell . يتمّ جمع المعلومات عن خلفية كل من الضوضاء والزخم في المنطقة المحيطة بكل هدف ومن ثم يجري ضبط مستوى الكشف لتلك المنطقة بناءً على تلك الخلفية . استبدلت التقنيات التماثلية لتحقيق CFAR بتقنيات المعالجة الرقمية للإشارات DSP ذات المرونة العالية في التصميم والدقة الكبيرة في الأداء . أبرز الطرائق المستخدمة لتحديد مستوى الكشف باستخدام المعالجة الرقمية طريقة تمييز المطال ، تمييز الطور وخريطة الزخم .

تعتبر طريقة تمييز المطال Amplitude Discrimination البديل الرقمي لمعالجة الإشارة بواسطة التكبير اللوغريتمي والتفاضل السابق ذكرها في هذا الباب ، وتعرف أيضاً بطريقة إيجاد متوسط المدى أو متوسط الخلية Cell Averaging . يتمّ تقدير متوسط مطالات الإشارات في خلايا المدى المجاورة لكل خلية على حدة ومن ثم يتمّ حساب نسبة الإشارة إلى التداخل . نسبة لأنّ التقدير يتم بناءً على عدد محدود من العينات فإنه يتأرجح حول القيمة الحقيقية زيادة ونقصاناً وتعرف الزيادة اللازمة في نسبة الإشارة إلى الضوضاء للحصول على معدل الكشف المطلوب بفقد CFAR . تعتبر هذه الطريقة فعالة مع الزخم الناتج عن المطر وأمواج البحر ، إلا أنها أقل فاعلية مع الأهداف الأرضية ذات معدل التغير الكبير مع المدى .

في طريقة تمييز الطور Phase Discrimination يتم الاستغناء عن المعلومات المطالية في إشارات الصدى بتحديد Limiting مطالات الإشارات إلى مستوى أقل

من مستوى الضوضاء الطبيعي . يجري تمييز الإشارات وسط التداخل اعتماداً على التغيير في زوايا الطور بعد التحديد لذا لا تعاني هذه الطريقة من معدلات التغير الكبيرة حيث يتم فقط قياس مدى توافق إشارة الصدى مع العينات الطورية المحسوبة سلفاً .

تستخدم طريقة خريطة الزخم Clutter Map لتوفير معدل كشف جيد للطائرات التي تطير بقرب مناطق الزخم . بخلاف الطريقتين السابقتين والتي تجري المعالجة بهما على أساس خلايا المدى ذات البعد الواحد ، فإنّ المعالجة تتم على أساس خلايا ثنائية البعد مثلما بالشكل 6−2 ، عمقها مدى وعرضها سمت وعبر عدد من دورات الهوائي . يتم تخزين بيانات توزيع الزخم أثناء دوران الهوائي على شكل خريطة رقمية تستخدم للكشف عن الأهداف ذات البيانات المتغيرة . تصلح هذه الطريقة مع الزخم الثابت كالجبال وليست فعالة في حالة الزخم غير المستقر كالمطر وفي حالات التداخل الشديد .

أسئلة وتمارين

1− أوجد شكل دالة الارتباط الذاتي لنبضة وحيدة عرضها τ ومطالها A .

2− اشرح الغرض من التكبير اللوغريتمي والتفاضل للإشارات الرادارية وكيفية تحقيقه مع الرسم . اشرح ما هو دور الثنائي الموصول في خرج المفاضل .

3− اشرح المقصود بالترشيح التوافقي للإشارات الرادارية مع ذكر شكل من أشكال النبضة المستخدمة قي ذلك .

4− اشرح فكرة التحكم الزمني بالتكبير ثمّ اكتب علاقة رياضية متوقعة بين كل من جهد التحكم بمعامل تكبير المكبرات والزمن .

5− وضّح الفرق بين التكامل قبل وبعد الكشف .

6− تحدث عن طريقة CFAR المعروفة بإيجاد متوسط المدى أو متوسط الخلية وعلاقتها بإحدى طرائق المعالجة التماثلية .

7- بالمعادلات وضِّح أنَّ خرج المرشح المتوافق مع الإشارة المرسلة يعادل دالة الارتباط التقاطعي للإشارة المستقبلة مع الإشارة المرسلة مع تأخير زمني .

8- هوائي رادار زاوية شعاعه 2° يدور بسرعة 10RPM ، أوجد عدد النبضات القادمة في الدورة من هدف نقطي بمجال الرادار إذا كان تردد تكرار نبضته 300Hz .

الباب الخامس

تمييز الأهداف المتحركة

5-1 ظاهرة دوبلر

ظاهرة دوبلر Doppler Effect هي ظاهرة طبيعية مصاحبة لكل أشكال الموجات بما فيها الموجات الصوتية والموجات الكهرمغنطيسية . وتتلخص الظاهرة في أنّ الموجة المرسلة من مصدر ما إلى مستقبل بينه وبين ذلك المصدر حركة نسبية ، تصل إلى المستقبل بتردد يختلف عن التردد الأصلي للموجة .

إذا أمكننا التعبير عن المقدار اللحظي للموجة عند المرسل بدلالة كل من المطال A والتردد f أو التردد الزاوي ω وفقاً للعلاقة الجيبية التالية

$$\Psi(t) = A \cos 2\pi f t \qquad 5\text{-}1$$

$$\Psi(t) = A \cos \omega t \qquad 5\text{-}2$$

فإنه يمكن التعبير عن الموجة المستقبلة بدلالة زمن رحلتها بين المرسل والمستقبل t_d بالعلاقة

$$\Psi(t) = A \cos \omega(t + t_d) \qquad 5\text{-}3$$

والتي يمكن كتابتها كالتالي

$$\Psi(t) = A \cos(\omega t + \Phi) \qquad 5\text{-}4$$

حيث Φ زاوية الطور Phase Angle وتعادل

$$\Phi = \omega t_d \qquad 5\text{-}5$$

بما أن سرعة الموجة تكون ثابتة خلال عبورها لوسط ما ، فإنّ زمن رحلة الموجة بين المرسل والمستقبل وبالتالي زاوية طور الموجة يرتبطان بسرعة انتشار الموجة v والمسافة المقطوعة r بالعلاقتين التاليتين

$$t_d = r / v \qquad 5\text{-}6$$

$$\Phi = \omega r / v = \beta r \qquad 5\text{-}7$$

حيث β ثابت الطور Phase Constant . بالاستفادة من المعادلة 8-1 فإنّ β تعادل

$$\beta = \omega / v = 2\pi / \lambda \qquad 5\text{-}8$$

في حال وجود تغير في المسافة r بين المرسل والمستقبل لوجود حركة نسبية Relative Motion بينهما ، فإنّ زاوية الطور تتغير تبعاً لذلك التغير مما ينتج عنه تغيير في تردد الموجة المستقبلة نسبة لأنّ التردد الزاوي الناشئ هو معدل التغير في طور الموجة ويعادل

$$\omega_d = d\Phi / dt = \beta v_r \qquad 5\text{-}9$$

حيث v_r هي السرعة النسبية بين المرسل والمستقبل ، ويسمى التردد الناتج بتردد دوبلر أو بإزاحة دوبلر Doppler Shift ويعبَر عنه بأي من المعادلتين

$$f_d = \omega_d / 2\pi = v_r / \lambda \qquad 5\text{-}10$$

$$f_d = (v_r / v) \; f \qquad 5\text{-}11$$

حيث تزيد إزاحة دوبلر بزيادة النسبة بين السرعتين وزيادة تردد الموجة f . تعتمد إشارة تردد دوبلر على اتجاه السرعة النسبية بين المرسل والمستقبل إذ يكون موجباً في حال تقاربهما لبعضهما وسالباً في حال تباعدهما عن بعضهما . ونجد أنّ تردد دوبلر في حالة الموجة المستقبلة من هدف متحرك بواسطة الرادار يتضاعف نسبة لمسار ذهاب ورجوع الموجة ، أي أنّ

$$f_d = 2 v_r / \lambda \qquad 5\text{-}12$$

إذا ما كانت السرعة النسبية بين الرادار والهدف بالعقدة knots ، والتي تعادل ميلاً بحرياً nautical mile واحداً في الساعة (1.852 كلم / ساعة) ، والطول الموجي بالأمتار ، فإنه يمكن حساب تردد دوبلر بالهيرتز بالعلاقة

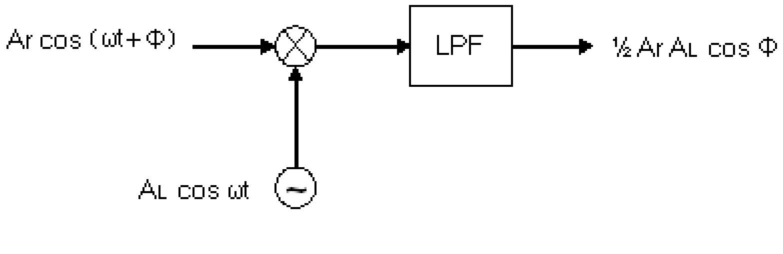
$$f_d = 1.03 v_r / \lambda \qquad 5\text{-}13$$

2-5 تمييز الأهداف المتحركة

يستقبل الرادار إشارات منعكسة من أهداف غير مرغوبة ولم يتمّ تصميم الرادار من أجلها يمكن تسميتها بالأهداف غير المرغوبة أو الزخم Clutter والتي تعمل على تقليل أداء الرادار من حيث صعوبة تمييز الأهداف المطلوبة من بينها .

من أبرز الأهداف تلك الأهداف الثابتة كالجبال والمباني وسطح الأرض والتي تقوم بعكس الإشارات الرادارية في اتجاه الرادار . إضافة إلى أنّ بعض الأهداف المتحركة بسرعات بطيئة كالسحب والأمواج والطيور والمركبات الأرضية غالباً ما تُعتبر زخماً . ويعتبر الزخم إضافة إلى الضوضاء والتداخل من أكبر العوائق بالنسبة للرادار ، فلذا كان لا بد من إيجاد طرائق لمعالجة الإشارات الرادارية المستقبلة للتقليل من أثر الزخم . من أبرز المعالجات تلك تمييز الأهداف المتحركة Moving Target Indication ويختصر بالأحرف MTI ، والذي يعتمد في مبدأ عمله على ظاهرة دوبلر التي سبق شرحها .

في أنظمة تمييز الأهداف المتحركة القديمة نسبياً ، كان يستخدم مميز ترددات Frequency Discriminator أو مزيل التعديل الترددي للكشف عن التغير في تردد الإشارة المستقبلة عن المرسلة وبالتالي تمييز الهدف المتحرك . إلاّ أنّ هذه الطريقة ينقصها الاستقرارية خاصة في حال عدم استقرار مرسل الرادار نفسه .



الشكل 5-1 كاشف الطور

يستخدم كاشف الطور الحسّاس Phase Sensitive Detector لقياس زاوية طور الإشارة بالنبضة المستقبلة ومقارنتها مع زوايا طور الإشارة بالنبضات التي تليها . إذا تساوت زوايا الطور عبر النبضات المتتابعة ، فإنّ ذلك يدلّ على أنّها منعكسة من

هدف ثابت ، في حين يدلّ عدم تساويهنّ على أنّ الهدف يتحرك داخل مجال الرادار وبذا يمكن تمييزه من الأهداف الثابتة . يتكون كاشف الطور في أبسط صوره من ضارب أو مازج يتبعه مرشح تمرير منخفض LPF كما بالشكل 5−1 أعلاه . يعمل المازج على ضرب الإشارة المستقبلة مع إشارة مولّدة محلياً لها نفس تردد وطور الإشارة المرسلة من الرادار لنحصل على

$$v_x = A_r \cos(\omega t + \Phi) \,.\, A_L \cos \omega t \qquad 5\text{-}14$$

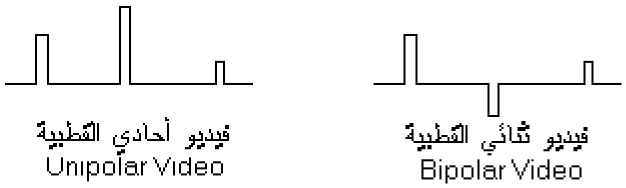
$$= \tfrac{1}{2} A_r A_L \{ \cos(2\omega t + \Phi) + \cos \Phi \} \qquad 5\text{-}15$$

وبعد الترشيح نحصل على

$$v_o = \tfrac{1}{2} A_r A_L \cos \Phi \qquad 5\text{-}16$$

تؤخذ إشارة دخل كاشف الطور عادة من خرج مكبرات التردد المتوسط بمستقبل الرادار وتمزج مع إشارة المذبذب المتزامن Coherent Oscillator ، المتزامن مع المرسل والذي يساوي تردده التردد المتوسط للمستقبل . إذا كانت إحدى إشارتَي الدخل بدلالة الجيب والأخرى بجيب التمام لحصلنا على $\tfrac{1}{2} A_r A_L \sin \Phi$.

هذا ويعتبر كشف الطور أحد طرائق إزالة تعديل إشارة التردد المتوسط إلى جانب كاشف الغلاف الذي تعرضنا له في الباب الثالث . إلاّ أنّ كاشف الطور يعتبر كاشفاً متزامناً لاعتماد إشارة خرجه على طور الإشارة المستقبلة إضافة إلى مطالها ، في حين يعتبر كاشف الغلاف كاشفاً غير متزامن لاعتماد إشارة خرجه على مطال الإشارة المستقبلة دون طورها . كما نراها في الشكل 5−2 أدناه ، فإنّ إشارة الفيديو الناتجة عن كاشف الطور ثنائية القطبية Bipolar لطبيعة دالة جيب التمام ، في حين أنّ إشارة الفيديو من كاشف الغلاف أحادية القطبية Unipolar موجبة أو سالبة حسب اتجاه الثنائي بدائرة الكاشف المبينة بالشكل 3−4 .

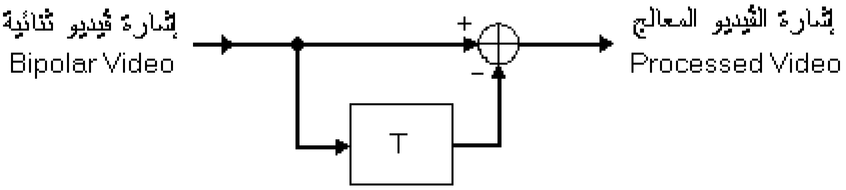


الشكل 5−2 قطبية إشارة الفيديو

3-5 مرشح الأهداف المتحركة

بعد إزالة تعديل الإشارة المستقبلة بواسطة كاشف الطور ، يتمّ ترشيح إشارة الفيديو لإلغاء الأهداف غير المرغوب فيها ومنعها من الوصول إلى مبين الرادار . عملياً لا يحدث إلغاء كامل ولكن يجري تقليل لمستوى الزخم وذلك باستخدام مرشحات MTI .

أبسط الأشكال لمرشحات MTI هو ذاك المرشح الذي يُعرف بلاغي النبضتين Two-pulse Canceller وهو عبارة عن دائرة تقوم بتأخير نبضة الفيديو وطرح مطالها من مطال النبضة القادمة . يستخدم لذلك مؤخِّر Delay زمن تأخيره يعادل فترة تكرار النبضة ، بالإضافة إلى طارح Subtractor كما بالشكل 5−3 أدناه .



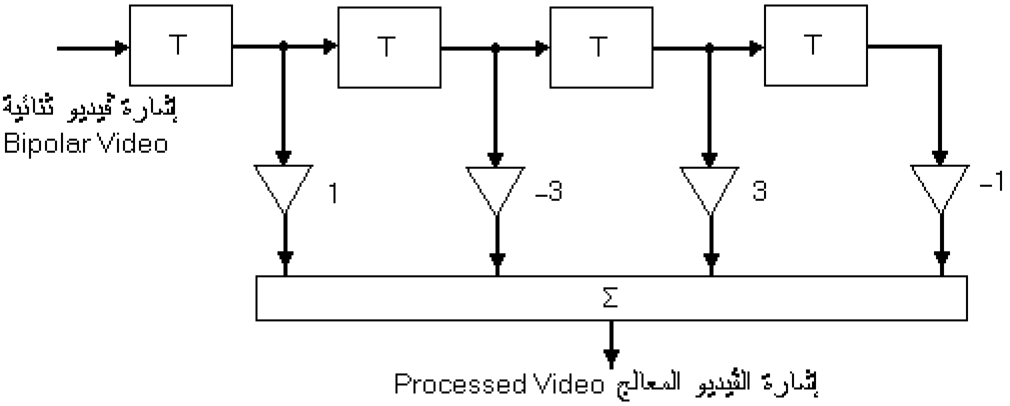
الشكل 5−3 مرشح MTI لاغي النبضتين

تتقابل النبضات المنعكسة من نفس الهدف كل فترة تكرار النبضة (أي بمعدل تردد تكرار النبضة) ليتم طرح مطالاتها . في حال تساوي مطالَي نبضتين متتاليتين منعكستين من نفس الهدف ، يكون الخرج صفراً لتساوي زاويتي الطور بالنبضتين فيتم إلغاء نبضات الفيديو الناشئة عن الأهداف الثابتة . بالإضافة إلى إلغائها الأهداف الثابتة ، نجد أنّ عملية تمييز الأهداف المتحركة تقوم بتحسين نسبة إشارات الأهداف السريعة للأهداف البطئية الحركة وبالتالي زيادة وضوحها على شاشة الرادار وإن كانت ذات نبضات ضعيفة قبل إجراء عملية MTI . يمكن التعبير عن معامل تحسين MTI بالعلاقة

$$\textit{Improvement Factor} = SCR_o \;/\; SCR_i \qquad 5\text{-}17$$

حيث SCR هي نسبة الإشارة إلى الزخم Signal-to-Clutter Ratio . يمكن زيادة معامل تحسين MTI باستخدام عدة مرشحات موصلة على التتالي لتكوين لاغي ثلاث نبضات أو أكثر . إلاّ أنه يفضل استخدام مرشحات MTI رقمية كالمرشحات

المستعرضة Transversal Filters لسهولة تصميمها ومرونته حيث يتمّ ذلك فقط باختيار الأوزان a_n المناسبة للمرشح . نجد الأوزان تساوي [1,-1] في مرشح لاغي النبضتين ، [1,-2,1] في لاغي النبضات الثلاث ، [1,-3,3,-1] في لاغي النبضات الأربع مثل الموضّح في الشكل 5−4 أدناه . لكل المرشحات نجد أنّ الوزن الأول a_0 = 1 وأنّ مجموع الأوزان يساوي صفراً .



الشكل 5−4 مرشح MTI رقمي

4-5 الاستجابة الترددية لمرشح MTI

إذا كان تردد دوبلر في الإشارة الرادارية المستقبلة من هدف معين أقل من السعة الترددية المثلى للمستقبل والتي تعادل مقلوب عرض النبضة ، أي إذا كان

$$f_d < 1/\tau \qquad 5\text{-}18$$

فإنّ تردد نبضات الفيديو الناتجة من كاشف الطور لذلك الهدف يعادل PRF ، في حين يتغير غلافها بتردد يعادل تردد دوبلر . يمكن التعبير عن غلاف جهد إشارة الفيديو ثنائية القطبية الناتجة في خرج كاشف الطور لعدة نبضات متتالية بالعلاقة

$$v_1 = k \sin(2\pi f_d t + \Phi_o) \qquad 5\text{-}19$$

حيث Φ_o الإزاحة في الطور اعتماداً على المدى ، k مطال الإشارة . غلاف جهد الإشارة قبل فترة زمنية تعادل فترة تكرار النبضة T يُعطى بالعلاقة

$$v_2 = k \sin(2\pi f_d (t - T) + \Phi_o) \qquad 5\text{-}20$$

عند معالجة مرشح MTI لاغي النبضتين لإشارة خرج الكاشف ، تصبح إشارة خرجه

$$v = v_1 - v_2 \qquad 5\text{-}21$$

$$= 2\,k \sin(\pi f_d T)\cos(2\pi f_d (t - T) + \Phi_o) \qquad 5\text{-}22$$

باستخدام المتطابقة المثلثية لفرق جيبي زاويتين . الاستجابة الترددية للمرشح أو استجابة المطال هي القيمة المطلقة لدالة النقل وتعادل حاصل قسمة مطال جهد الخرج على مطال جهد الدخل حيث

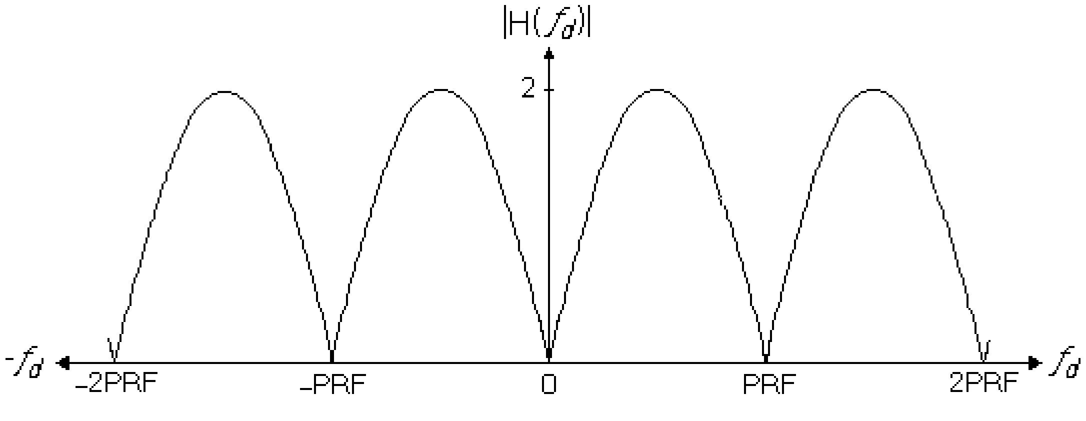
$$|H(f_d)| = 2 \sin(\pi f_d T) \qquad 5\text{-}23$$

يتضح من العلاقة أعلاه أنّ الاستجابة الترددية للمرشح دالة في تردد دوبلر ولها قيم صفرية عندما تساوي زاوية دالة الجيب بالزاوية π أو إحدى مضاعفاتها حيث

$$\pi f_d T = n\,\pi \qquad 5\text{-}24$$

$$f_d = n / T = n\,PRF \qquad 5\text{-}25$$

حيث $n = 0, \pm1, \pm2,...$. الشكل 5−5 أدناه يوضح شكل الاستجابة الترددية لمرشح MTI لاغي النبضتين .



الشكل 5−5 الاستجابة الترددية لمرشح MTI

يتضح من شكل الاستجابة الترددية لمرشح MTI المبينة أعلاه أنها دالة دورية في تردد دوبلر نتيجة لدورية استجابة كاشف الطور لزاوية طور إشارة دخله ، حيث يتكرر مقدار الدالة الجيبية كل نصف دورة كاملة للزاوية .

5-5 السرعات العمياء

من شكل الاستجابة الترددية لمرشح MTI أعلاه ومن المعادلة 5-25 نجد أنّ خرج المرشح معدوماً عند ترددات دوبلر أخرى خلاف الصفر هي مضاعفات تردد تكرار النبضة PRF . نتيجة لذلك فإنّ المرشح لا يستبعد الأهداف الثابتة فحسب بل يستبعد أيضاً تلك التي تتحرك محدثة ترددات دوبلر تعادل تردد تكرار النبضة أو أحد مضاعفاته .

تعتبر هذه الظاهرة عيب من عيوب مرشحات تمييز الأهداف المتحركة وتنشأ نتيجة لحركة الأهداف بسرعات نسبية معينة من الرادار تعرف بالسرعات العمياء Blind Speeds لعدم تمكن الرادار من رصد تلك الأهداف رغم وصول إشارات الصدى منها .

لإيجاد السرعات العمياء للهدف ، نستخدم المعادلة 5-12 والتي تعطي تردد دوبلر بدلالة الطول الموجي λ ونعوض بدلاً عنه في المعادلة 5-25 لنحصل على السرعات العمياء

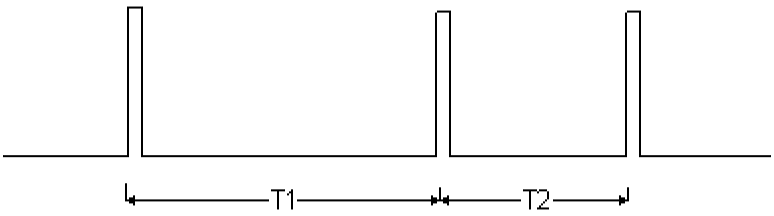
$$v_B = n\ PRF\ \lambda / 2 \qquad 5\text{-}26$$

يمكن إيجاد السرعات العمياء أيضاً بمعلومية أنّ إلغاء الهدف المتحرك بين موقعين عند نبضتين متتابعتين ناتج عن تساوي جيبَي (أو جيبَي تمام) زاويتي الطور في النبضتين رغم اختلاف الموقع . سبب ذلك هو تساوي الفرق في مدى الهدف بين الموقعين وأحد مضاعفات نصف الطول الموجي $\lambda/2$ ، أي أنّ

$$\Delta r = n \lambda / 2 \qquad 5\text{-}27$$

وذلك لدورية الطور مع المسافة كما يتضح من المعادلة 5-7 والمعادلة 5-8 . السرعات العمياء هي معدل الفرق في المدى بين الموقعين خلال فترة تكرار النبضة T مقلوب تردد تكرار النبضة ، وتعادل

$$v_B = \Delta r / T = n\ PRF\ \lambda / 2 \qquad 5\text{-}28$$



الشكل 5−6 تردد تكرار النبضة المترنِّح

للتخلص من عمى السرعات العمياء برادار MTI ، يتم تغيير تردد تكرار النبضة بصورة مستمرة وبنسق معيّن بما يعرف بتردد تكرار النبضة المترنِّح Staggered أو المتناثر Sparse . تضمن هذه الطريقة اختلاف السرعات العمياء بين كل نبضة وأخرى وبالتالي التمكن من رصد أي هدف متحرك ، سواءً قصد الحركة بسرعة عمياء بغرض تضليل الرادار أو لم يقصد ذلك .

6-5 زوايا الطور العمياء

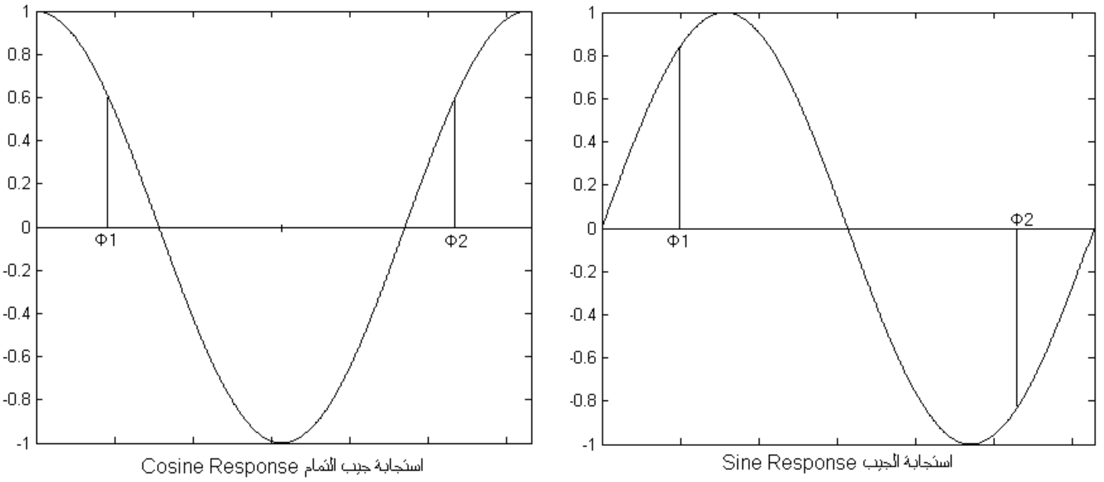
من عيوب مرشح MTI أيضاً زوايا الطور العمياء Blind Phases والتي تنتج من تماثل استجابة كاشف الطور حول منتصفه مما ينتج عنه تساوي جيبي تمام زاويتين مختلفتين وبالتالي تساوي إشارة خرجه لإشارتي دخل بأطوار مختلفة .

يؤدي عمى زوايا الطور هذا إلى إمكانية إلغاء مرشح MTI إلى هدف متحرك جاءت منه نبضتي صدى متتاليتين بزاويتين عمياوتين كما بالشكل 5−7 أدناه . كحل للمشكلة يتم استخدام كاشفي طور أحدهما استجابته دالة جيب التمام كالمعتاد ، بينما الآخر استجابته دالة الجيب بإزاحة طور إشارة المذبذب المتزامن COHO الداخلة إليه بمقدار $\pi/2$ كما بالشكل 5− 8 .

من شكل الاستجابتين أدناه ، نلاحظ أن أي زاويتين تظهران عمياوتين بأي من الاستجابتين لا تظهران كذلك بالأخرى . يتمّ ترشيح خرج أي من الكاشفين على حدة ومن ثم يتمّ جمع خرجي المرشحين جمعاً طورياً Phasor Sum للحصول على إشارة الفيديو المعالجة . إشارة خرج الكاشف الأول والناتجة عن استجابة جيب التمام تسمى

بالإشارة مشتركة الطور Inphase ، في حين تسمى إشارة خرج الثاني بالإشارة متعامدة الطور Quadrature .

في حال استخدام كاشف طور واحد فقط ، فإنّ جهد إشارة الفيديو ينعدم تماماً قبل الترشيح عندما تصل إشارة الصدى من الهدف إلى الكاشف بزاوية طور مقدارها {0,π} إذا كان من نوع الجيب ، أو بزاوية طور مقدارها {π/2,3π/2} إذا كان من نوع جيب التمام ، سواءً كانت من هدف ثابت أو متحرك .



الشكل 5–7 الزوايا العمياء

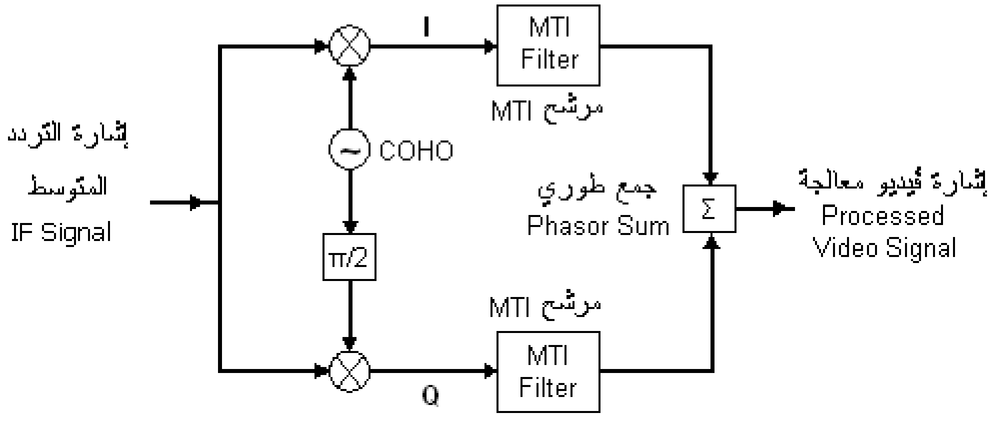
5-7 السرعات التماسية

ينتج تردد دوبلر في إشارة الهدف المتحرك عن السرعة النسبية بينه والرادار حسب العلاقة بينهما في المعادلة 5-12 . نجد أنّ السرعة النسبية ترتبط بكل من سرعة الهدف v وزاوية اتجاه حركته من الخط الواصل بينه والرادار ψ بالعلاقة

$$v_r = v \cos \psi \qquad 5\text{-}29$$

ينعدم تردد دوبلر عندما يسير الهدف بزاوية عمودية على الخط الواصل بينه والرادار أي عندما يتحرك بسرعة تماسية Tangential Speed فيقوم مرشح MTI بإلغائه من شاشة الرادار . لتفادي عيب السرعات التماسية يتم إضافة قناة غير متزامنة موازية لقناة MTI المتزامنة ثم يتمّ جمع إشارتي خرجيهما للحصول على إشارة ذات نسبة أهداف متحركة إلى زخم عالية .

من المعتاد أن يتوفر لعامل الرصد أداة للتحكم بمستوى سطوع الزخم الظاهر على الشاشة حسب ما يناسبه مثل التأكد من ضبط المدى بالمعايرة بأهداف ثابتة ومحددة لديه كالجبال وكذلك للحصول على خلفية تضاريسية للشاشة . كما يمكنه مراقبة انتشار السحب داخل مجال الرادار لإرشاد الطائرات دون الحاجة إلى رادار إرصاد جوّي ، لذلك نجد أن القناة غير المتزامنة في بعض الأنظمة تعرف بقناة الطقس Meteo Channel .



الشكل 5-8 استخدام قناتين متزامنتين

على الرغم من عيوب نظام تمييز الأهداف المتحركة MTI ، إلاّ أنه يمتاز ببساطة تصميمه وقلة كلفته ويمكن تنفيذه باستخدام التقنيات التماثلية أو الرقمية . في الجانب الآخر نجد بعض التقنيات الرقمية المستخدمة لتقليل الزخم تتصف بالتعقيد وارتفاع الكلفة مقارنة مع تقنيات MTI والتي أبرزها ما يعرف بكشف الأهداف المتحركة Moving Target Detection ويختصر MTD ، والمستخدم في الرادار الدوبلري .

أسئلة وتمارين

1- هدف سرعته 360 knots يتجه نحو رادار تردده 300MHz ، أوجد تردد إشارة الصدى المستقبلة منه وإشارته .

2- أوجد الاستجابة الترددية لمرشح MTI لاغي النبضتين رياضياً وارسمها .

3- استنبط قانون عام للاستجابة الترددية لمرشح MTI لاغي أي عدد من النبضات .

4 -اشرح الفروق بين الكشف المتزامن وغير المتزامن للإشارات الرادارية مستعيناً برسم كل من الكاشف وشكل إشارتي الدخل إليه والخرج منه في كل حالة .

5 -هدف يسير في اتجاه الشمال الشرقي بسرعة 360 عقدة رصده رادار تردده 150MHz وتردد تكرار نبضته 250Hz عند زاوية اتجاه 270° ، أوجد تردد إشارة الصدى المستقبلة منه ثم أوجد السرعة العمياء التي يمكن أن يسير بها نفس الهدف في تلك اللحظة .

6 -عدِّد واشرح عيوب مميز الأهداف المتحركة مع شرح العلاج المتبع لكل منها بالتفصيل .

7 -ارسم دائرة لمرشح رقمي مستعرض لاغي ثلاث نبضات مع توضيح أوزان الضرب به .

8 - قم بتصميم مرشح رقمي مستعرض لاغي خمس نبضات باستنباط أوزانه . الإجابة هي [1,-4,6,-4,1] .

9 -باستخدام برنامج MATLAB ، أوجد الاستجابة الترددية للمرشح أعلاه وارسمها .

10- باستخدام برنامج SIMULINK ، قم بتصميم نموذج لمحاكاة كاشف الطور ومرشح مميز الأهداف المتحركة MTI لاغي النبضتين .

الباب السادس

معالجة البيانات الرادارية

6-1 مقدمة

من أبرز محدوديات رادار الاستطلاع التقليدي الحاجة إلى كادر بشري عالي التأهيل لتشغيل النظام إضافة إلى الحاجة إلى عدد من العاملين لتشغيله مما يعقد من ترتيبات العمل بينهم بصورة منسقة وسهلة في نفس الوقت .

أضف إلى ذلك محدودية الدقة في القياس بواسطة الحواس البشرية وعدم مقدرتها على الاستمرار لفترات طويلة دون راحة مما يستوجب تقسيم العمل بين عدة أشخاص وبالتالي يزيد من العدد المطلوب للتشغيل . إلى جانب الدقة في القياس يصعب التعامل البشري مع عدد كبير من الأهداف وتتبعها على الشاشة في نفس الوقت دون إغفال بعض منها .

يتم نقل المعلومات الرادارية في الأنظمة اليدوية بواسطة الاتصالات الصوتية مما يعمل على تقليل معدل تدفق المعلومات ويقلل من كفاءة منظومة الاستطلاع بمجملها . كما يتم تسجيل البيانات الرادارية عن الحركة الجوية على مدار الساعة للاستفادة منها مستقبلاً سواءً للتحليل أو مراجعة حركة العبور بصورة يدوية بتدوينها على لوحات الرسم أو كتابتها على الورق مما يؤثر على صلاحية حفظها ومقدار الاستفادة منها .

نجد أنه رغم أن الكشف الأساسي عن الأهداف يتم بواسطة وحدات الرادار الإلكترونية ، إلا أنّ القرار النهائي في تحديد نتيجة الكشف يقع على عامل الرصد أمام شاشة الرادار . العامل هو من يحدد إذا ما كانت البقعة Plot المعروضة على الشاشة تمثل هدفاً أم أنها إنذار كاذب ناتج عن قمة جبل يعرف مكانه أو أنّ بقعة أخرى صغيرة يمكن أن تكون بسبب طائر كبير أو أخرى ناتجة من أثر تداخل محطة إرسال إذاعي في ذلك الاتجاه [7] . كما أنّ على عامل الرصد القيام بتتبع كل الأهداف

وفي آن واحد لتحديد مساراتها وتقدير سرعاتها دون حدوث التباس قد ينتج لتقاطع مسارات الأهداف المختلفة .

نسبة لما ذكر من محدوديات للكشف اليدوي وما يتبعه من تدني في الأداء وارتفاع في كلفة التشغيل ، كان لا بد من السعي إلى تطوير ما يمكن تطويره ليجري كل من الكشف والتتبع بشكل آلي . هذا وقد تحقق ذلك بإدخال التقنيات الرقمية والحاسوب للقيام بالكشف الآلي على الإشارات الرادارية وبمعالجة البيانات الرادارية Radar Data Processing بعد الكشف .

2-6 قياس الزاوية والمدى

في الأنظمة الرادارية التي تستخدم مبينات تقليدية مثل مبين المدى أو مبين المدى والسمت ، يتمّ الحصول على إحداثيات الهدف بصورة بيانية من الشاشة بواسطة عامل الرصد ، إذ لا توجد إشارة كهربية أو قيمة رقمية تعبر عن أي منهما بصورة مباشرة . حتى يتمّ الحصول على البيانات الرادارية ثمّ معالجتها ، يجب توفير إحداثيات الأهداف على شكل إشارات رقمية .

يتمّ الحصول على معلومات زاوية الهدف في الرادار بقياس زاوية اتجاه الهوائي لحظة وصول نبضة الصدى من الهدف وذلك عن طريق مجس للموضع Position Sensor مرتبط ميكانيكياً مع عمود دوران الهوائي . يعتبر المحوِّل المتزامن Synchronous Transformer من أبرز مجسات الزاوية التي كانت تستخدم لضبط تزامن دوران خط المسح في مبين المدى والسمت مع دوران الهوائي . ذلك المحول عبارة عن مولِّد كهربي ذي وجهين أو ثلاثة أوجه .

تماشياً مع المعالجة الرقمية ، يكثر حالياً استخدام المضمِّن الضوئي Optical Encoder الذي يعطي مقدار الزاوية في صورة رقمية ويشتمل على عدّاد يعمل على عد نبضات ساعة السمت ACP's الناشئة بسبب دوران عمود الهوائي ، يتمّ تصفيره بواسطة نبضة علامة الشمال North Mark التي تنشأ عند مرور الهوائي باتجاه الشمال الجغرافي كما بالشكل 6-1 أدناه .

الشكل 6-1 المضمّن الضوئي

من الباب الأول نعلم علاقة مدى الهدف بالزمن المحسوب من لحظة انطلاق النبضة المرسلة حتى وصول نبضة الصدى من الهدف . تنتج نبضات ساعة المدى RCP's من وحدات التزامن الأساسية بالرادار مع انطلاقة النبضة المرسلة وتستمر حتى اكتمال مدى الرادار لتعبر كل منها عن مدى محدّد ، وعند ورود النبضة المستقبلة من الهدف يتمّ تسجيل رقم نبضة ساعة المدى المطابقة لها كمقياس للمدى . تزداد الدقة والتمييز في تحديد المدى بزيادة عدد النبضات المستخدمة وبصغر عرض النبضة الرادارية المرسلة .

تسمى المساحة المكونّة من أصغر مدى وزاوية يمكن تحديد مقداريهما بخلية المدى Range Cell والتي عادة ما تجري معالجة البيانات على أساسها . نلاحظ أنّ تعريف خلية المدى المشار إليه هنا لا يختلف عمّا سبق ذكره في تقنيات CFAR لمعالجة الإشارة الرادارية بالباب الرابع .

3-6 الكشف الآلي

لتقليل الأخطاء الناتجة عن الكشف اليدوي للأهداف الرادارية ولتحسين معدل الكشف ، فقد تمّ ابتكار عدة تقنيات للكشف الآلي Automatic Detection . تختلف الكاشفات الآلية في فكرة عملها ولكن تتفق في مهامها وهي :

- تكامل نبضات الصدى المستقبلة
- اتخاذ القرار بوجود الهدف وشرعيته
- إيجاد إحداثيات الهدف .

كثير من خوارزميات الكشف تبدأ بطريقة أداء عامل الرصد الجالس أمام مبين المدى والسمت ، والذي دوره الأساسي البحث عن تراكمات البقع على شاشة المبين والتي تمثل تكاملاً للنبضات القادمة من نفس الهدف . يهمل عامل الرصد البقع الصغيرة التي تنشأ من الانعكاس من أجسام صغيرة كالطيور ويهتم بالبقع الأكبر والتي تمثل الأهداف ، بينما يهمل كذلك البقع الكبيرة جداً والتي تنشأ من الانعكاسات من الأجسام الضخمة كالجبال والمباني .

من تقنيات الكشف الآلي التماثلية الأساسية استخدام التكامل بعد الكشف والذي سبق ذكره في الباب الرابع وذلك لزيادة طاقة إشارة الفيديو إلى أعلى مستوى ممكن لها ، ثمّ تمريرها إلى كاشف طاقة للكشف عن الإشارات ذات مستويات الطاقة الأعلى والناتجة من أهداف صحيحة .

أبرز الكاشفات الآلية الرقمية الشائع استخدامها هو كاشف النافذة المنزلقة أو المتحركة Sliding or Moving Window Detector ذو مستويَي الكشف [1]. إشارة دخل هذا الكاشف إشارة فيديو ثنائية ، تعرف بالأبيض والأسود B/W ، قام كاشف مستويات بإنتاجها من نبضات الفيديو متعددة المستويات المزال تعديلها . تمثل القيمة العليا للإشارة الثنائية قبول النبضة المستقبلة كنبضة صدى صحيحة وإن كان ذلك لا يعني تقرير وجود هدف صحيح بعد .

يعمل كاشف النافذة المتحركة كمكامل للنبضات حيث يقوم بتعداد نبضات الفيديو الثنائية داخل نافذته المتحركة ويقرِّر وجود بقعة صحيحة من هدف في حالة تحقيق عدد النبضات شروط الكشف وهي وقوعه بين المستوى الأدنى والمستوى الأعلى للكشف ، أي أنّ

$$TH_L \leq \tilde{n} \leq TH_H \rightarrow \text{A Valid Plot Exists} \qquad 6\text{-}1$$

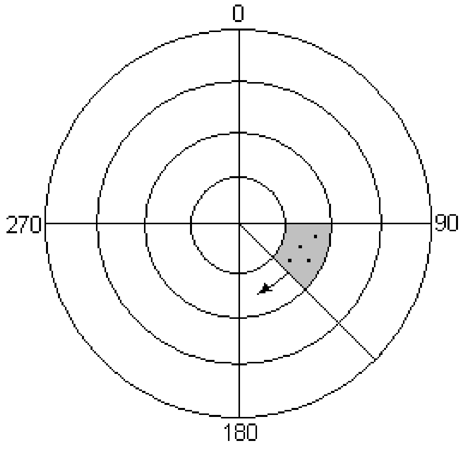
$$\tilde{n} < TH_L \text{ OR } \tilde{n} > TH_H \rightarrow \text{No Valid Plots Exist} \qquad 6\text{-}2$$

يعتمد تحديد مستويي الكشف المذكورين على مساحة نافذة الكاشف ، إذ يجب زيادة كل منهما في حال كبر مساحة النافذة التصميمية . أمّا في حالة الزيادة الناتجة في

مساحة النافذة للزيادة في مدى الهدف بالابتعاد عن المركز ، فإنه يجب تصغير كليهما . كما يعتمدان على تردد تكرار النبضة حيث يزيد أي منهما للزيادة المتوقعة في عدد النبضات المستقبلة حسب المعادلة 28-4 ، وبالمثل لزيادة المقطع الراداري للأهداف المراد رصدها .

يعمل كاشف النافذة المتحركة على البقع المخزونة بذاكرة النظام لتتحرك النافذة الافتراضية على سطح مماثل لمجال عمل الرادار أو شاشة مبين المدى والسمت بحيث تتقدم في اتجاه زيادة زاوية السمت في اتجاه عقارب الساعة ، وبحيث يزيد موقع حافتها المتقدمة بما يعادل التمييز في السمت والذي يعادل زاوية شعاع الهوائي Beamwidth كما بالشكل 6-2 أدناه .

بعد إكمال دورة كاملة حول المركز، تقفز النافذة إلى الخارج مبتعدة عن المركز لمواصلة دورة جديدة بما يعادل عمق خلية المدى والذي يحدد التمييز في المدى في خرج هذا الكاشف إلى جانب عرض النبضة الرادارية المستقبلة . في حال كشف وجود هدف صحيح ، يتم أخذ مركز النافذة كتقدير لموقع الهدف المكتشف بما يعرف اصطلاحاً بشطر الشعاع Beam Splitting .



الشكل 6-2 كاشف النافذة المتحركة

يزيد كاشف الطاقة بعد الكشف Post-detection من نسبة الإشارة إلى الضوضاء في وجود الضوضاء البيضاء ، في حين يستقبل كاشف النافذة المتحركة نبضات ثنائية الجهد وبذلك لا يعتمد في أدائه على طاقة النبضة المستقبلة وبالتالي يعتبر ذو

كفاءة أقل من المكامل بعد الكشف المثالي . ولكننا بالمقابل نجد أنّ كاشف النافذة المتحركة يعمل بكفاءة أعلى في وجود مصادر ضوضاء غير قاوسية التوزيع Non-Gaussian . يعرف الكاشف الآلي أيضاً في كثير من مراجع معالجة البيانات الرادارية بمستخلص البقع [8] Plot Extractor ، الذي عادة ما يتم تحقيقه باستخدام عدة معالجات رقمية للإشارة أو حاسوب ذي سرعة معالجة كبيرة .

4-6 التتبع أثناء البحث

من الباب الأول نعلم أنه يوجد رادار يعرف برادار التتبع ومن اسمه يتضح أن وظيفته تتبع الأهداف أثناء حركتها داخل مجال عمله . يتتبع هذا الرادار هدفاً واحداً في كل مرة بحيث يتجه شعاع الهوائي نحو ذلك الهدف بصورة مستمرة دون الالتفات لأهداف أخرى . يعرف هذا النوع من التتبع الراداري بالتتبع داخل الشعاع Within-beam Tracking والذي يستخدم في وحدات التحكم بالنيران ، وهو خارج نطاق هذا الكتاب .

النوع الثاني من التتبع يعرف بالتتبع أثناء البحث Track-while-scan ، وتختصر TWS ، والذي يستخدم في أنظمة الاستطلاع بغرض تتبع الأهداف المكتشفة أثناء البحث عن أهداف أخرى ورصد مساراتها دون حدوث تغيير في حركة دوران الهوائي والتي تتواصل بسرعة ثابتة .

تتم عملية التتبع أثناء البحث على البيانات الرادارية مباشرة بعد إجراء الكشف الآلي أو استخلاص البقع التي سبق الحديث عنه . عادة ما يتم تحقيق هذه المعالجة الرقمية باستخدام حاسوب من النوع المعتاد ولكن ذو سرعة عالية وذاكرة كبيرة ، بخلاف الكاشف الآلي الذي غالباً ما يستخدم دوائر رقمية أو معالجات رقمية للإشارة Digital Signal Processors ذات سرعات معالجة عالية مقارنة بالحواسيب التقليدية . يتمّ تصميم برنامج المعالجة بواسطة إحدى لغات البرمجة الموجهة للكائنات OOP مثل لغة ++C [22] لتوافقها مع فكرة التعامل مع الأهداف الرادارية التي تظهر وتختفي مما يتطلب إدارة محكمة لذاكرة الحاسوب [7].

يعمل معالج TWS على إنشاء مسارات للأهداف في الذاكرة عشوائية الوصول RAM بعد التأكد من استمرارية وجود الهدف من بيانات البقع القادمة إليه . عادة ما يبدأ البرنامج بإنشاء مسارات Track Initiation مؤقتة ، تتحول إلى مسارات دائمة في حال استمرار وجود الهدف داخل مجال الرادار لأكثر من دورة واحدة للهوائي . يقوم البرنامج بإنعاش المسارات بالبيانات الرادارية كالإحداثيات والسرعة واتجاه الحركة Heading في كل دورة جديدة للهوائي بصورة مستمرة دون خلط بيانات أي هدف مع آخر . عند اختفاء هدف من مجال الرادار ، يقوم البرنامج بالتأكد من ذلك في عدد من دورات الهوائي ثمّ يقوم بإنهاء المسارات Track Termination وذلك لتوفير الذاكرة لاستخدامها لأهداف أخرى .

من دواعي استخدام التتبع أثناء البحث الحاجة إلى استخدام مبينات رقمية مثل المبين المركب المشار إليه في الباب الثالث والذي يعتبر البديل الحالي لمبين المدى والسمت PPI التقليدي . يستخدم المبين بيانات المسار المرسلة إليه من حاسوب التتبع أثناء البحث لتحديد موقع الهدف على الشاشة وتوضيح اتجاهه وكتابة بعض البيانات كنص Text بجانب الرمز الممثل للهدف ، مثل تسمية الهدف أو ديباجته Label وإحداثياته وسرعته . كما يمكن رسم مسار الهدف على الشاشة على شكل منحنى باستخدام مواقعه السابقة المسجلة في الذاكرة لإضفاء مزيد من التأثيرات المرئية لعامل الرصد . تساعد هذه التأثيرات في تحليل طبيعة الهدف المرصود بشكل سهل ومريح ومقارنة مساره مع خطة الطيران Flight Plan المعدَّة له من قبل السلطات وإذا ما قام بخرقها .

في كثير من الحالات يوضع مبين الرادار في مكان بعيد عن الرادار كبرج المراقبة بالمطار أو مركز مراقبة عسكري لاختلاف بيئة العمل الخاصة بالرصد عن بيئة الرادار . كما أنه قد تدعو الحاجة إلى نقل البيانات الرادارية إلى أماكن بعيدة جداً كمراكز التحكم بالحركة الجوية Air Traffic Control أو مراكز قيادة منظومات الدفاع الجوي مما يستوجب إرسالها عبر وسائط الاتصال المختلفة كالألياف البصرية وشبكات الهاتف والاتصالات اللاسلكية .

يعتبر التتبع أثناء البحث من وسائل تقليل السعة الترددية للإرسال مما يقلل من كلفة نقل المعلومات الرادارية ، حيث يتمّ بعد المعالجة إرسال بيانات مسارات الأهداف فقط وليس إرسال نبضات الفيديو ذات الطيف الكبير . كما لا تصبح هنالك ضرورة لإرسال نبضات تزامن الرادار ودوران الهوائي والتي كانت تحتاج لقنوات مستقلة إضافية بخلاف المستخدمة لنقل الفيديو .

في أنظمة الكشف والتتبع الآلي لا بد من تحسين معالجة الإشارة الرادارية مثل معالجة MTI ومعالجة CFAR وذلك لتقليل كل من الزخم والضوضاء ، وحتى لا تصل بيانات عن أهداف غير حقيقية إلى المتتبع أثناء البحث مما يسبِّب تشبعاً للذاكرة عشوائية الوصول RAM .

5-6 تنعيم المسارات

من أهم القرارات التي يجب اتخاذها في نظام التتبع أثناء البحث هو تحديد إذا ما كانت البقعة الجديدة المكتشفة بواسطة الكاشف الآلي تنتمي إلى أحد مسارات الأهداف الموجودة سلفاً أم أنها ناتجة عن هدف مكتشف لأول مرة ويحتاج إلى إنشاء مسار جديد خاص به .

في حال تقرير تبعية البقعة الجديدة لأحد المسارات القديمة تطل إشكالية تحديد ذلك المسار من بين المسارات الأخرى ، لا سيما بالنسبة للمسارات القريبة من بعضها وبالأخص المسارات المتقاطعة . يُستفاد من ماضي الهدف من البيانات المخزونة في المسار على الذاكرة لتقدير أو تخمين الموقع المستقبلي للهدف باستخدام مرشح تنبؤي Prediction Filter يعمل على بيانات المسار .

يتم تخزين الموقع المتنبأ به بالذاكرة لاستخدامه للمقارنة مع مواقع البقع الجديدة التي ترد إلى النظام بإحداثيات تم قياسها فعلياً بالرادار . من الطبيعي أن يحدث خطأ في تقدير الموقع ، إلا أنه تُحسب القيمة المتوسطة للموقع بالإضافة إلى قيمة لتقدير الخطأ Error Estimation تستخدم في إيجاد التقدير التالي المتنبأ للموقع .

إن تطبيق الترشيح التنبؤي في التتبع الآلي للأهداف يساهم أيضاً في تنعيم المسارات Track Smoothing بترشيحها بتمرير الترددات الدنيا LPF مما يحسِّن من انسيابية المسار وتقليل التعرجات به . كما أن استخدام مرشحات تنبؤية متطورة تدخِل في حساباتها الطبيعة الإحصائية للرادار وللأهداف وكل ما يتعلق بقياس الإحداثيات يزيد من دقة القياس ويقلل الخطأ فيه بدرجة كبيرة تمكن حتى من تصحيح الخطأ في القياس الفعلي للإحداثي .

تستخدم في أنظمة التتبع عوامل موازنة Weighting Factors تعتمد قيمها على معرفة أخطاء الرادار نفسه وكيفية توزيع تلك الأخطاء . يتم ضبط قيَم تلك العوامل في بعض المتتبعات بصورة آلية بناءً على نجاح عملية التقدير والذي يعتمد على مقدار معدل الأخطاء بالنسبة للزمن ، وتعرف في الأدبيات بالترشيح المتكيّف Adaptive Filtering .

تتضح مزايا الضبط الآلي لعوامل الموازنة في المرشحات التنبؤية عندما نأخذ في الاعتبار مدى التغير الكبير الذي قد ينشأ في دقة قياس الرادار والتي تتأثر بتغير قدرة الإشارة المستقبلة ، عدم استقرار دوائر النظام ، تقلبات الجو ، تنوع الزخم ، أثر الضوضاء وتباين المقاطع الرادارية للأهداف .

الترشيح التنبؤي هو عبارة عن خوارزمية رياضية يمكن تحقيقها باستخدام الدوائر الصلبة أو بواسطة البرمجيات كما هو الحال بالنسبة لنظام التتبع أثناء البحث في الرادار . توجد عدة مرشحات تنبؤية تستخدم في مختلف الأغراض كالتحكم بالأنظمة اللا خطية وتصحيح أجهزة القياس وتوجيه الصواريخ والقذائف وفي أنظمة الاتصالات الرقمية ، تختلف عن بعضها في الدقة والسرعة وتعقيد التصميم ومقدار الكلفة .

من المرشحات الأكثر شيوعاً لا سيما في نظم الاستطلاع المدنية مرشِّح أو متتبِّع ألفا وبيتا Alpha-Beta Tracker ، وذلك لبساطة تصميمه وسهولة دمجه كجزء من برنامج التتبع أثناء البحث [7].

6-6 متتبع ألفا وبيتا

تأتي بساطة هذا المرشح من استخدامه لعوامل موازنة ذات قيَم ثابتة لا تتغير آلياً مع تغير الخطأ في تقدير الموقع . يستخدم المرشح عاملين للموازنة قيمة كل منهما أكبر من صفر وأقل من واحد صحيح ، أحدهما α ويتعلق بالخطأ في تقدير الموقع والآخر β والذي يتعلق بالخطأ في تقدير السرعة . في صورته الرياضية [1]، يقوم متتبع ألفا وبيتا بحساب كل من الموقع المُنعّم Smoothed Position الحالي والسرعة المُنعَّمة الحالية بالمعادلات التالية

$$\underline{x}_n = x_{pn} + \alpha (x_n - x_{pn}) \qquad 6\text{-}3$$

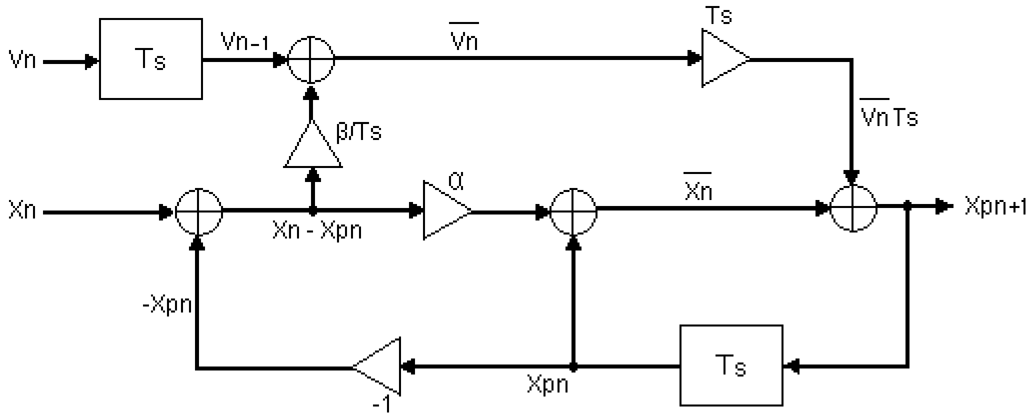
$$\underline{v}_n = v_{n-1} + \beta (x_n - x_{pn}) / T_s \qquad 6\text{-}4$$

حيث x موقع الهدف بالنسبة للرادار سواءً كان مدى أو زاوية ، x_n القيمة المقاسة بواسطة الرادار لموقع الهدف في الدورة الحالية n ، x_{pn} الموقع الذي جرى التنبؤ به مسبقاً للهدف لدورة الهوائي الحالية ، في حين أنّ T_s هو زمن الدورة الكاملة الواحدة ويمثل فترة أخذ العينات .

يتضح من المعادلات أنّه إذا كانت $\alpha = 0$ فإنّ الموقع المُنعّم للهدف يعادل الموقع المتنبأ به سابقاً ولا يتأثر بالخطأ في التنبؤ ، في حين إذا كانت $\alpha = 1$ فإنّ الموقع المُنعّم يعادل الموقع المقاس بواسطة الرادار ولا يتأثر بالتنبؤ . بالمثل فإنّه إذا كانت $\beta = 0$ فإنّ السرعة المُنعّمة للهدف تعادل السرعة المقاسة السابقة للهدف بأخذ أنّه يتحرك بسرعة ثابتة ، في حين إذا كانت $\beta = 1$ فإنّ السرعة المُنعّمة تصحَّح بمعدل تغير الخطأ في تنبؤ الموقع . يستخدم كل من الموقع المنعَّم والسرعة المنعمة لإيجاد الموقع المتنبأ به في الدورة القادمة $n+1$ كما يلي

$$x_{p(n+1)} = \underline{x}_n + \underline{v}_n T_s \qquad 6\text{-}5$$

يمكن تحقيق هذا المتتبع باستخدام المرشح الرقمي المبين بالشكل 6–3 أدناه والذي يستخدم مؤخرَين Delays اثنين لتخزين القيم الحالية لهذه الدورة إلى الدورة القادمة بتأخير يعادل زمن دورة الهوائي T_s .



الشكل 6-3 متتبع ألفا وبيتا

إذا كان الرادار غير مجهَّز لقياس السرعة من تردد دوبلر الناتج عن حركة الهدف ، يمكن حساب السرعة المتوسطة للهدف بين موقعين خلال دورة واحدة للهوائي بالعلاقة [7]

$$v_n = (x_n - x_{n-1}) / T_s \qquad 6\text{-}6$$

$$x_{p(n+1)} = (1 - (\alpha+\beta))\, x_{pn} + (1 + (\alpha+\beta))\ \ x_n - x_{n-1} \qquad 6\text{-}7$$

وكحالة خاصة إذا كانت $\alpha+\beta = 1$ ، فإنّ الموقع المتنبأ به للدورة القادمة

$$x_{p(n+1)} = 2\, x_n - x_{n-1} \qquad 6\text{-}8$$

للحصول على أفضل تنعيم ممكن ، يجب إيجاد قيمتي العامِلَين ألفا وبيتا بإجراء تجارب عملية على نظام الرادار المراد استخدام المرشح به وللأهداف التي صمم من أجلها . إلا أنّ بندكت Benedict قام باقتراح العلاقة التالية بينهما في أنظمة التتبع أثناء البحث [1] للحصول على قيم مُثلى

$$\beta = \alpha^2 / (2 - \alpha) \qquad 6\text{-}9$$

يمكن توسيع متتبع ألفا وبيتا ليشمل العجلة بالإضافة للموقع والسرعة لإعطاء نتائج أفضل ، ليعرف بمتتبع ألفا – بيتا – قاما . ورغم بساطة خوارزمية هذا المرشح وسهولة تحقيقه ، إلا أننا نجد أنّ متتبع ألفا وبيتا ذو أداء أقل مع الأهداف ذات المناورة العالية كالمقاتلات ويفضّل استخدام مرشحات تنبؤية أخرى لمواجهة تلك المشكلة أبرزها مرشّح كالمان Kalman Filter العادي أو المطوّر .

7-6 ترشيح البقع الكاذبة

يتم رفع حساسية مستقبل الرادار للحصول على معدل الكشف الأقصى الذي يوفر عدداً أكبر من الأهداف ويزيد من مدى الكشف كما سبق ذكره في الباب الثاني . إلا أنّ ذلك الإجراء قد يترتب بسببه إنتاج مستخلص البقع لعدد كبير من البقع الكاذبة ويزيد من معدل الإنذارات الكاذبة FAR .

يعمل معالج الإشارة على تقليل تلك الإنذارات الكاذبة الواصلة إلى مستخلص البقع بقدر استطاعته قبل مرحلة الكشف الآلي . تُرشَح بيانات البقع الكاذبة المتجهة إلى المتتبع بواسطة مرشح البقع الكاذبة False Plot Filter .

تعتبر فكرة عمل هذا المرشح بسيطة حيث يقوم بتخزين كل البقع صحيحة كانت أو كاذبة في مسار انتقالي لا تنتقل البقع منه إلى المتتبع أو إلى المبين إلا بعد أن يستوفي المسار شروطاً معيّنة . عادة يتحقق ذلك بعد توفر البقعة المشتركة الثالثة حيث تستخدم كل من البقعة الأولى والثانية لتأسيس المسار الانتقالي ولا تنتقلان من المرشح إلى المتتبع بل تظلان مخزونتين بفرضية اشتراكات أخرى في المسار لاحقاً .

في عملية التتبع أثناء البحث يجب أن توجد بقعة واحدة ابتدائية على الأقل لإنشاء المسار ولا تُعرض البقع التي لا تكوّن مسارات على المبيّنات . لذا فإنّ استخدام هذه الطريقة في التتبع وترشيح البقع الكاذبة يمكّن الرادار من العمل بحساسية عالية جداً وبمعدل إنذارات كاذبة منخفض ، حيث يصل احتمال الإنذارات الكاذبة Pfa إلى أقل من واحد في المليون [8].

أسوة بترشيح البقع الكاذبة يُستخدم مرشح الأهداف الكاذبة [7] False Target Filter وذلك لمعالجة البيانات الرادارية كجزء من المتتبع لإلغاء الأهداف الثابتة والبطيئة كالسيارات بما يشبه عملية تمييز الأهداف المتحركة MTI لمعالجة الإشارات الرادارية . إضافة لذلك يُتخذ القرار بإنهاء مسار أي هدف لا يتمكن الرادار من الاستمرار برصده لخروجه خارج مجال الرادار أو لانخفاض ارتفاعه .

8-6 تشكيل البيانات المرسلة

يقوم المتتبع أثناء البحث بإرسال بيانات مسارات الأهداف إلى الجهات المستفيدة الأخرى مثل المبينات المركَّبة ، مسجلات البيانات الرادارية وأنظمة التتبع المتعدد وذلك عبر منافذ الاتصالات المتسلسلة Serial Communications المختلفة .

تستخدم المنافذ الأساسية للحاسوب مثل منفذ RS232 أو منفذ الشبكة Ethernet لإرسال البيانات الرادارية إلى الوحدات القريبة من حاسوب المتتبع مباشرة ، مثل المبين المركّب المصاحب للرادار بغرض الضبط والصيانة أو إلى مراكز المراقبة المحلية القريبة للرادار . أمّا الإشارات المراد إرسالها إلى مواقع بعيدة فتحتاج إلى التعديل الرقمي Digital Modulation ، سواءً كان ذلك لإرسالها عبر كوابل نحاسية أو ألياف بصرية أو عبر الأثير وذلك باستخدام المعدِّل/مزيل التعديل Modem المناسب لقناة الاتصال المستخدمة .

عادة ما تُستخدم نفس قناة الاتصال للتحكم بالرادار ومراقبته بما يعرف بأنظمة التحكم والمراقبة من بُعد Remote Control and Monitoring Systems ، وتختصر RCMS . يمكن عن طريق هذه الأنظمة إيقاف أو تشغيل أي من وحدات الرادار أو ضبطها من بُعد ، بالإضافة إلى مراقبة أداء مختلف الوحدات أثناء عملها مع استمرار انسياب البيانات الرادارية من الرادار .

يحتاج إرسال الإشارات الرقمية إلى أن تكون بنية البيانات Data Format معلومة لدى كل من جهتي الإرسال والاستقبال وذك لفك رموزها ومعرفة ترتيب المعلومات التي تحملها . لاختلاف الشركات المصنعة وتباين النظم الرادارية نجد أنّ هنالك عدة بنيات لبيانات الرادار مستخدمة في شتى أنحاء العالم بعض منها عسكرية وأخرى مدنية تختلف باختلاف البلدان واختلاف الأحلاف العسكرية والتوزيعات الجغرافية . من البنيات المستخدمة والمدمجة كبنية اختيارية في كثير من المبينات المركبة المستخدمة في أنظمة الاستطلاع ، البنية القياسية لمنظمة الطيران المدني العالمية ICAO والتي تعرف ببنية الطيران المدني CA Format . وكذلك نجد البنية الأوربية

المتطورة أستريكس ASTERIX (وهي اختصار للجملة All Purpose Structured Eurocontrol Radar Information Exchange) ، إضافة إلى بنيات مدنية وعسكرية أخرى مختلفة .

في بنية الطيران المدني[8]، يتمّ تقسيم البيانات إلى حقول Fields ، طول كل حقل 13 بت واحدة منها لسلامة البيانات Parity Bit . تدمج الحقول لتشكل رسائل Messages طول كلٍّ منها أربعة حقول في حالة إرسال بيانات رادار الاستطلاع الأولي PSR فقط . أما في حالة وجود رادار استطلاع ثانوي SSR يشارك الرادار الأولي نفس معالج البيانات ، كما يرد في الباب التاسع ، فتُستخدم سبعة حقول .

الحقل الأول لأي رسالة هو الحقل العاطل Idle Field ويُرسل وحده في الرسائل العاطلة عندما لا توجد بيانات مرسلة . الرسائل العاطلة ذات حقل واحد ونمط ثابت وسلامة بيانات زوجية Even Parity كما يوضح الشكل 6-4 أدناه ، وتستخدم بغرض التزامن حيث ترسل رسالة عاطلة واحدة على الأقل بعد كل رسالة .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

الشكل 6-4 الرسالة العاطلة

من الرسائل التي ترسل من المتتبع تلك التي تحمل بيانات الهدف ، وحقولها الأربعة هي حقل الهوية ID ، المدى ، السمت وحقل امتداد سمت الهدف . البت الأولى بحقل الهوية تساوي '1' فقط عندما يقوم المتتبع بإنتاج أهداف محاكاة Simulated وإرسالها إلى المبين بغرض التدريب أو الضبط . تمثل الكلمة المكونة من البت رقم2 إلى البت رقم12 هوية الهدف أو ترتيبه بين الأهداف والبت رقم13 لسلامة البيانات كما بالشكل 6-5 أدناه .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
T	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	P

الشكل 6-5 حقل الهوية

الكلمة المكونة من البت رقم1 إلى البت رقم12 بحقل المدى تمثل المدى المائل Slant Range للهدف بتمييز يعادل 1/16 من الميل البحري حيث البت رقم1 هي البت ذات الدلالة العظمى MSB والبت رقم13 لسلامة البيانات كما بالشكل 6-6 أدناه .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
128	64	32	16	8	4	2	1	1/2	1/4	1/8	1/16	P

الشكل 6-6 حقل المدى

الكلمة المكونة من البت رقم1 إلى البت رقم12 بحقل السمت تمثل سمت أو زاوية اتجاه الهدف من الرادار بالنسبة لاتجاه الشمال ، بتمييز 0.088° وتقابله نبضة سمت ACP واحدة كما بالشكل 6-7 أدناه .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1	P

الشكل 6-7 حقل السمت

البت رقم1 بحقل امتداد سمت الهدف تساوي '0' ، في حين من البت رقم2 إلى البت رقم6 تمثل امتداد السمت Azimuth Runlength للهدف أو عرضه بنبضات السمت . من البت رقم7 إلى البت رقم12 تمثل الزمن الذي استغرقته الرسالة في المعالج كما بالشكل 6-8 أدناه .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	64	32	16	8	4	4	2	1	1/2	1/4	1/8	P

الشكل 6-8 حقل امتداد سمت الهدف

9-6 التتبع المتعدد

يمكن استخدام رادار الاستطلاع لتغطية مجال جوّي محدد بالمدى الأقصى للرادار الذي يعتمد على كل من فترة تكرار نبضته وعناصر معادلة الرادار المعلومة . من الصعب تغطية كل المجال الجوي لمعظم البلدان لا سيما الكبيرة منها باستخدام رادار

واحد نسبة لمحدودية مدى الرادار ولأثر كروية الأرض في كشف الأهداف البعيدة ذات الارتفاعات المنخفضة . وبما أنه يفضل استخدام عدة ترددات وخصائص رادارية مختلفة ، فإنّ الأنظمة الرادارية عادة ما تعمل في داخل شبكات مشكلة من عدد من تلك الأنظمة .

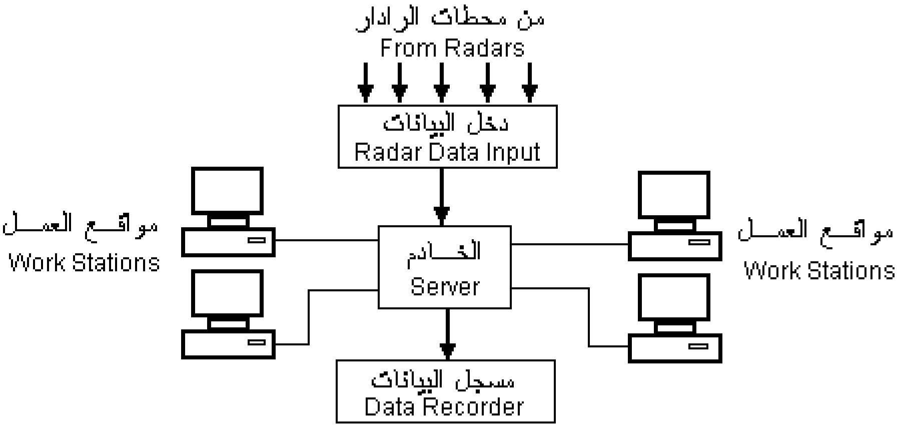
في السابق كانت تلك الشبكات الرادارية موصولة عن طريق الاتصالات الصوتية لتبادل المعلومات فيما بين أطرافها . إلا أنّه بعد التقدم الذي طرأ في كل من الكشف والتتبع الآلي وتطور تقنيات الاتصالات الرقمية أصبح نقل البيانات عبر الشبكات يتم بصورة آلية وسريعة . تستخدم وسائط الاتصال المختلفة كخطوط الهاتف التقليدية والألياف البصرية والاتصالات اللاسلكية والفضائية في نقل البيانات الرادارية من محطات الرادار المنتشرة في كل البقاع إلى مراكز لتجميع وتحليل المعلومات .

في ظلّ هذا التحول في تقنيات ومفاهيم الاستطلاع ، تطور أسلوب معالجة البيانات الرادارية بالشبكة ليتم دمج بيانات مسارات الأهداف المستقبلة من عدة محطات رادارية في متتبع واحد مشكلاً ما يعرف اصطلاحاً بمنظومة التتبع المتعدد للأهداف Multi Tracking. يمكن في هذه الحالة عرض المعلومات على شاشات المراقبة بحيث يظهر كل المجال الجوّي المغطى بعدة محطات رادار كما لو كان مغطىً برادار واحد فقط .

تشتمل منظومة التتبع المتعدد على عدة مواقع عمل Workstations بها حواسيب موصولة في شكل شبكة محلية LAN كما بالشكل 6-9 أدناه . كما تشتمل المنظومة على معدات للاتصال بين المنظومة ومحطات الرادار وعلى وحدات لتسجيل البيانات الرادارية لعرضها وتحليلها مستقبلاً .

كما يتمّ في مراكز التحكم بالحركة الجوية ATC تسجيل المحادثات الصوتية بين كل من الموجِّهين والمراقبين الجوّيين من جهة والطيّارين أثناء تحليق طائراتهم من جهة أخرى . مثال لنظم التتبع المتعدد المستخدمة منظومة توباز [9] Topaz والتي

تستقبل البيانات الرادارية من ثماني محطات رادار استطلاع في وقت واحد وذلك لعرضها وتحليلها بمركز المراقبة والسيطرة .



الشكل 6-9 منظومة التتبع المتعدد

من بين التقنيات المستخدمة في التتبع المتعدد تقنية توسيط المسارات حيث تتقاطع مجالات عمل محطات الرادار الموجودة بالشبكة وترصد نفس الأهداف من أكثر من محطة . تقوم منظومة التتبع المتعدد بأخذ متوسط معلومات مسارات الهدف من المتتبعات المحلية لكل رادار ثمّ تعمل على تأسيس مسار لذلك الهدف في ذاكرة المنظومة لتخزين بياناته بعد معالجتها .

لكننا نجد أنّ توسيط المسارات محلياًَ [5] Local Track Averaging LTA بإجراء التنعيم للمسارات في كل متتبع محلي على حدة ثم إجراء عملية التنعيم مرة ثانية بمنظومة التتبع المتعدد ، أو ما يعرف بالتوسيط المزدوج Double Averaging ، قد يؤدي إلى خطأ التنعيم المتكرر . ينتج ذلك الخطأ نسبة لتكرار إجراء التنعيم الأمر الذي من شأنه تقليل مقدرة المتتبع المتعدد على كشف مناورات الأهداف لا سيما السريعة منها .

أسئلة وتمارين

1- تحدث عن دواعي معالجة البيانات الرادارية .

2- بالرسم عدِّد مراحل انتقال الإشارة المستقبلة والبيانات بالرادار بعد خروجها من المزدوِج .

3- صف كيفية عمل كاشف النافذة المتحركة . وضّح إذا ما كان يمكن اعتبار هذا الكاشف مكاملاً للنبضات الرادارية .

4- رادار عرض نبضته المرسلة 1μs وزاوية شعاع الهوائي المستخدم به 2° ، ما هو العدد الكلي للنوافذ التي يمر بها كاشف النافذة المتحركة في كل دورة للهوائي إذا كان تردد تكرار نبضة الرادار 333Hz .

5- اشرح المقصود من أنّ المتتبع أثناء البحث يقلل من السعة الترددية اللازمة لنقل المعلومات الرادارية .

6- أذكر الغرض من استخدام المرشحات التنبؤية في التتبع بالرادار .

7- بالمعادلات أشرح طريقة عمل مرشح متتبع ألفا وبيتا ثمّ ارسم تركيب مرشح رقمي للمرشح مع توضيح القيم المستخدمة وإشارات دخل وخرج كل مرحلة من مراحل المرشح .

8- مستخدماً بنية الطيران المدني ، اكتب شفرة الرسالة الرقمية الثنائية Binary المرسلة من متتبع أثناء البحث والخاصة بهدف هويته 0137 ، مداه من الرادار 240km ، زاوية اتجاهه أو سمته 75° وامتداد سمته سبعة نبضات .

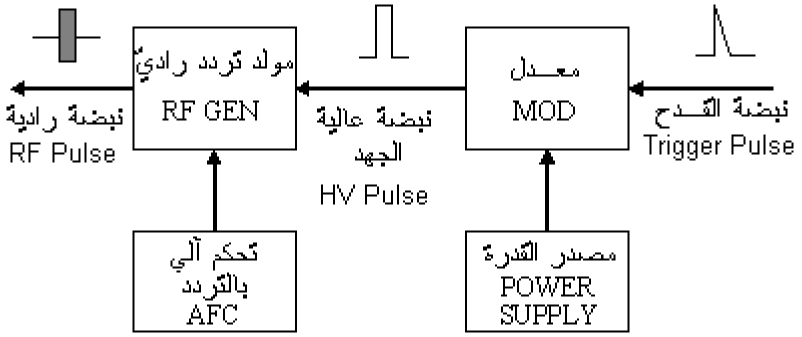
الباب السابع

مرسلات الرادار

7 – 1 خواص المرسل

يعتبر مرسل الرادار الفعّال مصدر الطاقة الكهرمغنطيسية المرسلة من الرادار والمنتشرة داخل مجال عمله سواءً بصورة مستمرة أو على شكل نبضات جيبية وبالتردد والقدرة المحددتين حسب متطلبات النظام الراداري المستخدم .

يتركب مرسل الرادار النبضي كما سبق ذكره في الباب الثالث من وحدتين أساسيتين هما مولِّد التردد الرادي والمعدّل ، بالإضافة إلى دوائر التحكم الآلي بالتردد ومصادر التغذية بالتيار المباشر وخطوط ودوائر الربط ووحدات التهوية .



الشكل 7–1 تركيب مرسل الرادار

يتم اختيار تردد الرادار بناءً على عدة عوامل من بينها حجم النظام وكتلته لا سيما حجم الهوائي الذي يزيد بزيادة الطول الموجي المستخدم وخاصة لدى استخدام إشارة رادارية ذات تردد منخفض . وينطبق نفس الأمر على كل مكونات المرسل إذ تزيد أحجام كل من مولِّد التردد الرادي والمعدل وخطوط نقل الإشارة مما يشكل تبعات تصعِّب من استخدام النظام في بعض التطبيقات ، مثل الرادار المحمول Airborne أو المتحرك أو في حال معدلات المسح العالية التي تتطلب تحريك الهوائي ميكانيكياً . إلا أنّ زيادة تردد الإشارة المرسلة في الجانب الآخر تقلل من مدى

الرادار نسبة للتوهين Attenuation الذي تعانيه الإشارة أثناء انتشارها من وإلى الرادار .

إضافة لتردد الرادار ، يختلف تصميم مرسلٍ عن آخر باختلاف السعة الترددية لكل منهما وسهولة تغيير تردد الإرسال . السعة الترددية Bandwidth للمرسل هي الفرق بين أعلى تردد وأقل تردد ممكنين دون تغيير مؤثر في القدرة أو الكفاءة . إمكانية تغيير التردد Tunability وبالسرعة المطلوبة تعتبر من أهم خواص الرادار العسكري في سياق الحرب الإلكترونية وذلك بنوعيه ؛ الرادار سريع التغيير في التردد Frequency Agileورادار القفز الترددي Frequency Hopping . كما يحتاج الرادار لتغيير تردده لزيادة مقدرته على الكشف إذ تُكتشف أهداف عند ترددات معينة دون اكتشافها لدى ترددات أخرى بما يعرف بالتنوع في التردد Frequency Diversity .

من معادلات الرادار بالباب الثاني ، نجد أنّ الطاقة المرسلة من العوامل الهامة في تحديد المدى الأقصى للرادار . في الرادار النبضي تزيد طاقة النبضة المرسلة بزيادة كل من القدرة القصوى للمرسل وعرض النبضة . زيادة عرض النبضة يقلل كل من الدقة والتمييز في المدى المقاس بواسطة الرادار ، في حين تقليل عرض النبضة يستدعي استخدام مرسل ذي قدرة عالية قد تصل إلى بضع ميقاواطات في الأنظمة ذات المدى الكبير .

يتصف المرسل عالي القدرة بكبر حجمه واحتياجه لجهد مباشر عالي لتشغيله مما قد يؤدي إلى حدوث شرر Arcing بأجزاء المرسل المختلفة وإمكانية تولد إشعاعات متأينة مصاحبة مثل الأشعة السينية X-Ray والتي تشكل خطورة على الأشخاص المحيطين بالنظام ، الأمر الذي يتطلب إضافة دروع واقية تمنع أو تقلل من تسريب تلك الإشعاعات مما يزيد من حجم وكتلة المرسل .

كما نلحظ من معادلات الرادار ارتباط كل من القدرة القصوى للمرسل وعرض النبضة بكل من دورة عمل المرسل والقدرة المتوسطة المتوفرة من مصدر التغذية بالطاقة . إنّ عمل المرسل بدورة عمل صغيرة يسمح بتقليل درجة حرارته بواسطة

وحدات التبريد خلال فترة توقف الإرسال مما يقلل من احتمال تلفه ويحسِّن من كفاءته . الكفاءة Efficiency هي مقياس لمقدرة مرسل الرادار على تحويل الطاقة المسحوبة من مصدر التغذية بالتيار المباشر إلى طاقة تردد رادي بأقل فقد ممكن في دوائره . لا بد من توافق ممانعة خرج المرسل مع كل من ممانعة الهوائي ودوائر الربط ، وذلك لتحقيق أكبر كفاءة ممكنة وحماية المرسل من القدرة المرتدة إليه بالإضافة إلى تحقيق الانتقال الأقصى للقدرة Maximum Power Transfer .

يحتاج المرسل إلى العمل باستقرارية عالية توفر الاستقرار في كل من مطال وطور الإشارة المرسلة والعمل على إنتاج الإشارة بأقل تشويه Distortion ممكن لشكل موجة النبضة المشكلة بواسطة المعدِّل . يتضح التأثير السالب لعدم استقرارية المرسل أكثر ما يتضح في الأنظمة المتزامنة ، كالرادار المستمر CW ونظام تمييز الأهداف المتحركة والرادار الدوبلري حيث يعتمد أي منها في عمله على طور إشارة الصدى المستقبلة . ويشتد تأثير عدم الاستقرارية ذلك في الأنظمة التي تستخدم تعديلاً ترددياً أو طورياً للإشارة المرسلة إلى جانب التعديل النبضي ، مثل أنظمة ضغط النبضة وأنظمة تحريك الشعاع إلكترونياً بمصفوفات الطور والتردد.

ختاماً لدى ذكر خواص المرسل لا بد من الإشارة إلى كل من كلفته الابتدائية وإمكانية وكلفة الصيانة والزمن اللازم للصيانة MTTR بالإضافة إلى العمر الافتراضي Lifetime ، لا سيّما للصمامات ، والاستمرارية في العمل دون توقف والتي عادة ما تقدر بالزمن المتوسط بين الأعطال MTBF .

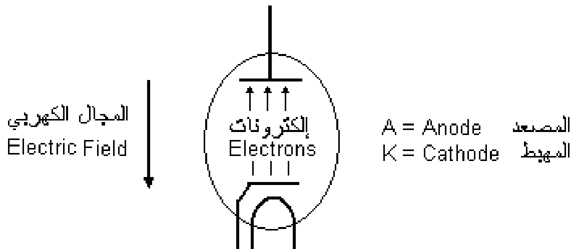
7 2 الصمّامات الفراغية

تُستخدم أدوات إلكترونية وموجية عديدة ومتباينة في مبدأ عملها لإنتاج إشارة التردد الرادي RF عالية القدرة بمرسل الرادار . يمكن تقسيم هذه الأدوات كما سبق ذكره في الباب الثالث إلى الصمامات الفراغية ، الأدوات مُقاطعة المجال ، الأدوات خطية الشعاع و أدوات الحالة الجامدة .

من أقدم هذه الأدوات استخداماً الأنابيب الفراغية Vacuum Tubes أو الصمامات الأيو–حرارية Thermionic Valves والتي حلت مكانها كثير من الأدوات الأخرى في معظم تطبيقات الإلكترونيات والاتصالات . إلا أننا نجدها ما تزال مستخدمة إلى اليوم في كثير من أنظمة الرادار كمعدّلات ، وأيضاً بمستوى أقل كمولّدات تردد رادي في المرسلات ذات الترددات المنخفضة في نطاقي التردد العالي HF والتردد العالي جداً VHF .

تمتاز هذه الصمامات بقلة تكلفتها مقارنة بالصمامات الأخرى ، وبالاستمرارية Reliability العالية مقارنة بأدوات الحالة الجامدة الحساسة للتغيرات المفاجئة في الجهد . كما أنّ لها مقاومة دخل كبيرة ومعامل ضوضاء قليل يجعلانها متميزة في تحقيق دوائر دخل المكبرات الصوتية . إلا أنها في المقابل ذات كفاءة متدنية وسعة ترددية محدودة لا تمكِّنها من العمل في نطاق الموجات المكروية .

تعتمد نظرية عمل الصمام الفراغي على مبدأ الإشعاع الأيوني الحراري للإلكترونات Thermo-ionic Emission . يتمّ تسخين سطح معدني من مادة غنية بالإلكترونات مثل مادة التنجستن ، فتتحرر بعض الإلكترونات من ذراتها مشكلة سحابة إلكترونية على سطح ذلك المعدن ، تُجذب الإلكترونات الحرة تلك بواسطة مجال كهربي ليتم تجميعها عند موقع آخر .

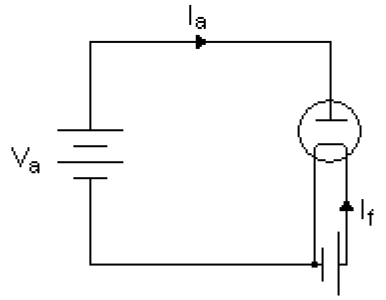


الشكل 7–2 الصمّام الثنائي

أبسط أنواع الصمامات الفراغية هو الصمام الثنائي Diode والذي يتكون من أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء بداخله مهبط Cathode من التنجستن ومصعد Anode

مصنوع من النحاس . يتم تسخين المهبط مباشرة بتمرير تيار كهربي عبر جسم المهبط مباشرة حيث يكون المهبط عبارة عن فتيلة Filament من السلك ، أو أن يكون مستقلاً ويحتضن سخّاناً كهربياً Heater داخل وعاء زجاجي لتسخينه كما بالشكل 7−2 أعلاه . يتم توصيل كل من المصعد والمهبط بأقطاب توصيل لاستخدامها في الدائرة الخارجية التي يستخدم الصمام كأحد مكوناتها .

في حالة استخدام سخّان مستقل عن المهبط يمكن استخدام مصدر تيار متردد أو مباشر لتغذيته ، إلاّ أنه يُفضل استخدام مصدر تيار مباشر في حال قيام المهبط بتسخين نفسه . بعد مرور تيار بالفتيلة لفترة كافية لرفع درجة حرارة المهبط وبعد تسليط جهد كهربي موجب على المصعد بالنسبة للمهبط ، يسري تيار إلكتروني من المهبط إلى المصعد داخل الصمام مما ينشئ تياراً كهربياً من المهبط إلى المصعد عبر الدائرة الخارجية كما بالشكل 7−3 .

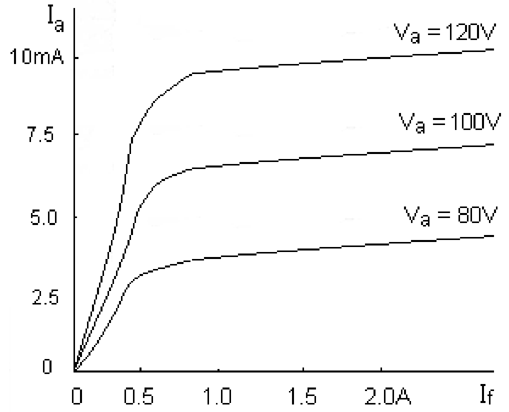


الشكل 7−3 دائرة الصمام الثنائي

يتناسب تيار المصعد I_a مع تيار الفتيلة I_f عند تثبيت جهد المصعد نتيجة للزيادة في عدد الإلكترونات المحررة من المهبط بواسطة الأثر الحراري للتيار ، والذي يتناسب مع مربع تيار الفتيلة ومقاومتها $I_f^2 R_f$. إلا أنه مع زيادة تيار الفتيلة وارتفاع درجة الحرارة ، يقل معدل الزيادة في إنتاج الإلكترونات مما يؤدي إلى تشبع Saturation في تيار المصعد كما يتضح من المنحنى في الشكل 7−4.

عادة يتم تثبيت جهد الفتيلة وبالتالي تيارها ليعتمد تيار المصعد على جهد المصعد V_a والذي يتناسب معه بشكل مماثل لأي من المنحنيات بالشكل 7−5 . تستخدم كثير

من الصمامات الفراغية جهد فتيلة متردد مقداره 6.3V توصل معه الفتائل على التوازي ، وذلك إذا ما أُريد عدم تأثر أي صمام بعدم وجود صمام آخر أو احتراق فتيلته . أمّا في حال تفضيل تعطيل عمل دوائر النظام بغرض الحماية عند رفع أحد الصمامات من الدائرة أو احتراق فتيلته ، فيتمّ توصيل كل الفتائل على التوالي مع مصدر التيار . يستخدم الصمام الثنائي في الأنظمة القديمة لتقويم التيار المتردد في وحدات التغذية لا سيّما النوع الذي به مصعدين ومهبط واحد لإنتاج موجة كاملة من خرج محول ذي ثلاث أطراف ، كما كان يستخدم ككاشف غلاف في المستقبِلات .

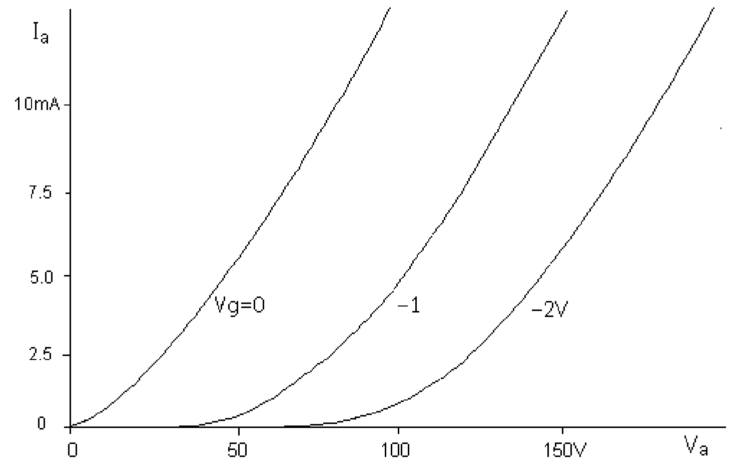


الشكل 7-4 منحنيات تيار الصمام الثنائي

7 3 الصمام الثلاثي

بإضافة شبكة معدنية بين المصعد والمهبط في الصمام الفراغي تمرّ من خلالها الإلكترونات وتوصيلها بقطب خارجي نحصل على الصمّام الثلاثي Triode . يمكن عن طريق هذه الشبكة التحكم بتيار الصمام وتوظيفه كمكبر ، وتسمى بالشبكة الحاكمة Control Grid ، أو باختصار الشبكة .

في حال ثبات جهد المصعد ، يتأثر التيار بالتغير في جهد الشبكة V_g إذ يزيد بزيادته نتيجة للتحفيز الناشئ لحركة الإلكترونات بسببه . حتى يتم التحكم في تيار المصعد بصورة أكثر خطية ولمنع سريان تيار في الدائرة الخارجية للشبكة ، يُسلط جهد انحياز سالب على الشبكة بالنسبة إلى المهبط . الشكل 7-5 يعرض منحنيات تيار المصعد مع كل من جهد المصعد وجهد الشبكة .



الشكل 7–5 منحنيات تيار الصمام الثلاثي

لتوفير جهد الانحياز السالب للشبكة ، توضع مقاومة R_k في دائرة المهبط ترفع جهده من جهد الخط الأرضي للمصدر أو الجهد صفر كما في الدائرة الموضحة في الشكل 7–6 ، في حين توصل الشبكة بمقاومة كبيرة إلى الخط الأرضي . نسبة لعدم وجود تيار شبكة يمر بالمقاومة R_g ، فإن جهد الشبكة يساوي صفراً وبالتالي يكون أقل من جهد المهبط بما يعادل I_aR_k . من الدائرة نجد أنّ المصعد موصول إلى مصدر التغذية بالتيار المباشر عن طريق مقاومة R_a والتي تمثل حملاً لتيار المصعد ، حيث يتغير جهد المصعد مع التيار بالعلاقة

$$V_a = V_A - I_a R_a \qquad 7\text{-}1$$

يتضح أنّه يمكن التحكم في تيار المصعد وبالتالي في جهده عن طريق تغيير جهد الشبكة . إذا ما سُلطت على شبكة الصمام إشارة جهد متغير وكان أقصى مطال موجب لها أقل من جهد انحياز الشبكة السالب ، فإنّنا نحصل على دائرة مكبر للجهد ذي مقاومة دخل كبيرة تعادل R_g . تعرف النسبة بين التغير في تيار المصعد إلى التغير في جهد الشبكة داخل الجزء الخطي للمنحنى بمعامل تكبير التيار Trans-conductance وتعادل

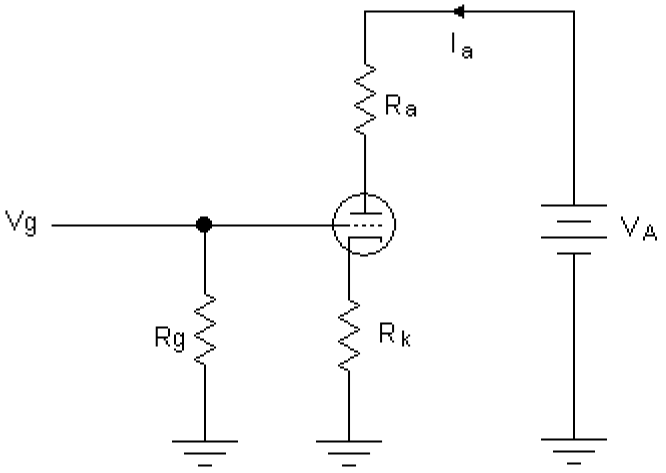
$$G_m = \Delta I_a / \Delta V_g \qquad 7\text{-}2$$

وباستخدام العلاقة 7-1 نجد أنّ التغير في جهد الخرج يعادل

$$\Delta V_a = - \Delta I_a R_a = - G_m \Delta V_g R_a \qquad 7\text{-}3$$

وبالتالي فإنّ معامل تكبير الجهد يصبح

$$A_V = \Delta V_a / \Delta V_g = - G_m R_a \qquad 7\text{-}4$$



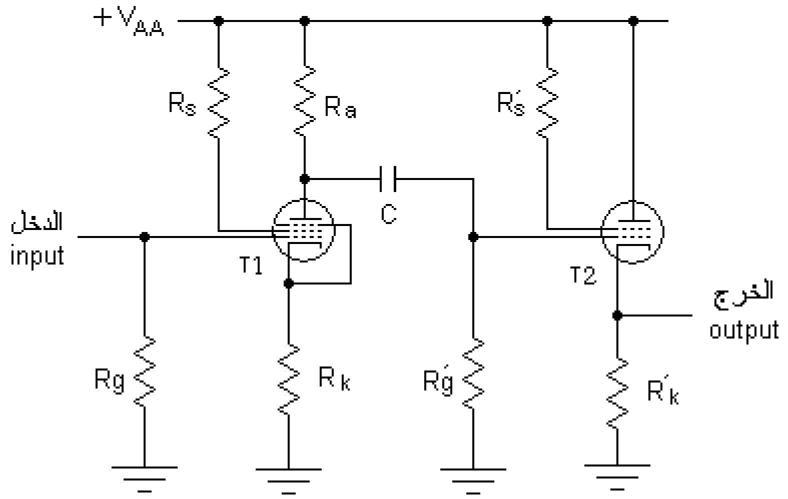
الشكل 7–6 دائرة الصمام الثلاثي

يوجد تشابه بين كل من الصمام الثلاثي والترانزستور الحقلي FET من حيث اعتماد التيار في كل منهما على جهد إشارة الدخل بخلاف الترانزستور ثنائي القطبية الذي يعتمد فيه التيار على تيار إشارة الدخل . إضافة لاستخدامه للتكبير ، يستخدم الصمام الثلاثي في بعض مرسلات الرادار المتري كمذبذب لإنتاج إشارة التردد الرادي عالية القدرة .

لزيادة معامل تكبير الصمام ، أضيفت شبكة أخرى بين الشبكة الحاكمة والمصعد تعرف بالشبكة الحاجبة Screen ليتشكل الصمّام الرباعي Tetrode . يتمّ تسليط جهد موجب أصغر من جهد المصعد على الشبكة الحاجبة يؤدي لزيادة كبيرة في تيار المصعد كما في الصمام T2 والمستخدم كتابع مهبط بالشكل 7–7 . رغم كبر معامل تكبيره ، نجد أنّ الصمام الرباعي يعاني من الإشعاع الثانويSecondary Emission بين الشبكة الحاجبة والمصعد ذو الجهد الأعلى إذ يسري تيار بالمصعد لا يعتمد على جهد الشبكة الحاكمة مما يقلل من حساسية التحكم بجهد الخرج .

تمت إضافة شبكة ثالثة بين الشبكة الحاجبة والمصعد موصولة مع المهبط داخلياً أو خارجياً للتخلص من مشكلة الإشعاع الثانوي ليتشكل الصمام الخماسي Pentode

مثل الصمام T1 والمستخدم كمكبر جهد في دائرة المكبر ذي المرحلتين والموضّحة بالشكل 7–7 . يمتاز هذا الصمام بمعامل تكبير عالي واستقرارية جيدة ، إلا أنّه ذو سعة داخلية كبيرة لتقارب الشبكات من بعضها الأمر الذي يحصر استخدامه في دوائر الترددات المنخفضة مثل المعدِّلات .



الشكل 7–7 الصمام الرباعي والخماسي

7 4 الماغنترون

الماغنترون Magnetron من الأدوات المُتقاطعة المجال Crossed Field Devices ويعتبر أكثر الصمامات المستخدمة لتوليد التردد الرادي في مرسلات الرادار النبضي العاملة في نطاق الموجات المكروية .

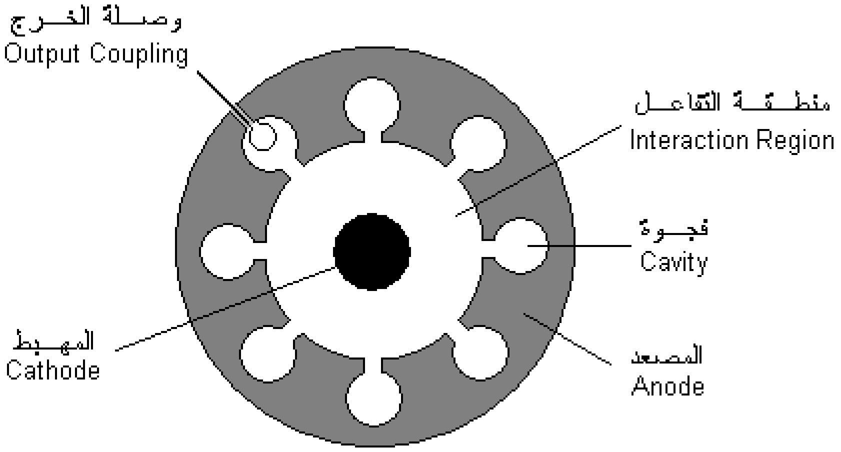
يصنّف الماغنترون كصمام ثنائي ذاتي التذبذب يمتاز بصغر حجمه ووزنه وتحمله للاهتزازات الميكانيكية والصدمات مما يؤهله للعمل بالأنظمة المحمولة والمتحركة Mobile . كما يمتاز أيضاً بطول عمره وقلة كلفته مقارنة بالأدوات الأخرى ، لذا نجده يستخدم في التطبيقات العامة كالأفران المكروية المنزلية وكمصدر للموجات المكروية في التجارب المعملية .

إلى جانب ذلك نجد أنّ الماغنترون يعمل على جهود كهربية منخفضة نسبياً مقارنة بكثير من الصمامات الأخرى العاملة في نفس النطاق الترددي وبكفاءة جيدة مما يقلل من مخاطر الإشعاعات الضارة .

إلا أنّ الماغنترون لا يعمل كمكبر مما يحد من عمله في كثير من الأنظمة التي تنتج إشارة التردد الرادي في مستويات قدرة منخفضة ثمّ يتم تكبيرها مثل الأنظمة المتزامنة كرادار دوبلر وأنظمة ضغط النبضة . كما يعيبه أيضاً عدم مقدرته على إنتاج نبضات عالية القدرة يقل عرضها عن 50ns الأمر الذي يؤثر في دقة قياس المدى بالرادار .

كذلك نجد أنّ الماغنترون ذو سعة ترددية قليلة تحد من استخدامه في الأنظمة التي تحتاج إلى تغيير تردد الإرسال بين فينة وأخرى لأسباب أمنية أو فنية . وبصورة عامة يعاني الماغنترون من عدم استقرارية التردد والطور مما يحد من استخدامه في الأنظمة الرادارية المتزامنة ويمنع استخدامه نهائياً في أنظمة الاتصالات المختلفة .

يتركب الماغنترون ذو الفجوات Cavity Magnetron من المهبط المتمركز عند وسطه والمصعد الذي يشكل الجسم الخارجي للصمام كما بالشكل 7−8 أدناه . تعرف المنطقة بين المصعد والمهبط بمنطقة التفاعل Interaction Region ، في حين تعرف الفجوات بداخل جسم المصعد بالفجوات أو الغرف الرنّانة وهي مفتوحة على منطقة التفاعل وتتساوى في أحجامها .



الشكل 7−8 الماغنترون ذو الفجوات

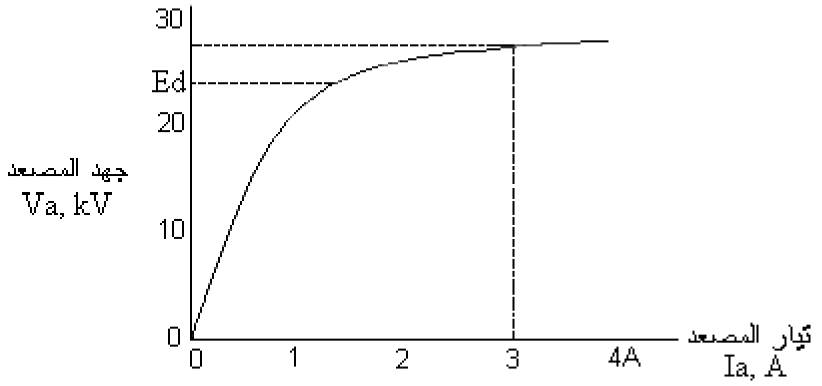
يوضع جسم الماغنترون النحاسي داخل الفراغ لمغنطيس دائم أو مغنطيس كهربي قوي على شكل حدوة الحصان بحيث يقاطع المجال المغنطيسي المجال الكهربي عمودياً في منطقة التفاعل بداخل الصمام . تتحرك الإلكترونات من المهبط بعد

تحررها منه بفعل الحرارة متجهة إلى المصعد عبر منطقة التفاعل ، تحت تأثير المجال الكهربي الناشئ بسبب فرق الجهد بين المصعد والمهبط .

نتيجة لحركتها ، تنشئ الإلكترونات حول مساراتها مجالات مغنطيسية تتفاعل مع المجال المغنطيسي الموجود بمنطقة التفاعل مما يجبرها على تغيير اتجاهاتها وجعلها تدور حول المهبط . في حال وصول شدة كل من المجالين المغنطيسي والكهربي والتيار الإلكتروني في منطقة التفاعل إلى مستويات معينة ، فإنّه تتولد موجات كهرمغنطيسية تنتشر نتيجة للحركة الدائرية للإلكترونات .

تعمل الغرف الرنّانة على تحديد تردد الموجة المطلوبة بناءً على أحجامها حيث يزيد التردد بصغر حجم الغرفة الرنّانة . لإيصال الإشارة المنتجة إلى الخارج ، يتمّ تمرير الموجة عن طريق دليل موجة Waveguide موصول بإحدى الغرف ، أو باستخدام حلقة Loop من السلك كهوائي صغير لتحويل الطاقة إلى كهربية وتمريرها عبر كابل محوري إلى خارج الصمام كما بالشكل . في حال استخدام دليل موجة ، يجب توفير ضغط جوّي داخله ليعادل الضغط الكبير داخل الصمام حتى لا ينهار الحاجز الزجاجي الموجود بينهما .

يتطلب تولد المجال الكهرمغنطيسي بالماغنترون شروطاً ترتبط بكل من المجال المغنطيسي والكهربي وحجم كل من منطقة التفاعل والفجوات وعدد تلك الفجوات .



الشكل 7–9 منحنى تيار الماغنترون

عند ثبات مقدار كل من المجال المغنطيسي ودرجة حرارة المهبط ، لا يصل تيار الماغنترون إلى قيمة مقدرة إلا بعد وصول الجهد بين المصعد والمهبط إلى قيمة حرجة تتولد بعدها إشارة التردد الرادي بصورة قوية ومستقرة . تعرف هذه القيمة الحرجة لجهد الماغنترون E_d بجهد هارتري Hartree Voltage ، وتعادل حوالي 90% من الجهد العامل للصمام كما هو موضّح بالمنحنى بالشكل 7–9 أعلاه .

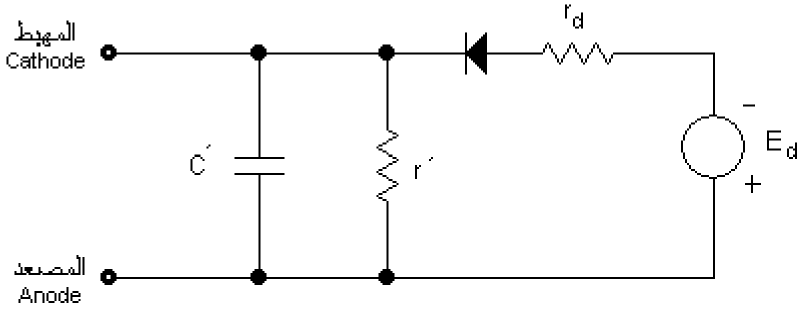
7 5 تحليل الماغنترون

يمكن أن تتولد بالماغنترون مجالات كهرمغنطيسية ذات قدرات منخفضة عند جهود أقل من جهد هارتري مما يستوجب التأكد من وصول جهده إلى الصفر مباشرة بعد اكتمال إنتاج النبضة الراديّة . كما أنّ عمل وأداء الماغنترون يتأثر بصورة مباشرة بالتغير في تيار المصعد وبالتغير في ممانعة الحمل والتي يشكلها كل من المزدوِج والهوائي ودوائر الربط .

يسمى التغير في التردد الناتج في إشارة خرج الماغنترون من التغير في التيار بمعامل الدفع Pushing Figure ووحدته وحدة تردد لكل وحدة تيار وعادة ما تستخدم MHz/A . كما يسمى الفرق بين أعلى وأقل تردد منتج في حال تغير طور الحمل بمقدار زاوية كاملة 360° بمعامل السحب Pulling Figure ، والذي يصل في العادة إلى أكثر من 15MHz .

يوجد عدد مقدر من الإلكترونات داخل منطقة التفاعل والتي لا تتمكن من تحويل طاقتها إلى طاقة كهرمغنطيسية وتعود إلى المهبط نسبة للانحناءات في مساراتها تحت تأثير المجالين المغنطيسي والكهربي . يتسبب ذلك في زيادة كبيرة بدرجة حرارة المهبط وتسمى تلك الزيادة بالحرارة الراجعة Back Heating ، والتي قد تسبب تلفاً بالصمام إذا ما لم يتمّ تداركها . لذلك يتم التحكم في تيار فتيلة الصمام إلكترونياً بتخفيض حرارة المهبط في حال ارتفاع القدرة المتوسطة لإشارة الخرج . يمكن في المرسلات التي لها دورة عمل كبيرة وقدرة عالية إطفاء الفتيلة بالكامل بعد التأكد من بدء عمل الصمام والاكتفاء بالحرارة الراجعة فقط لتسخين المهبط .

يتمّ تمثيل الماغنترون بدائرة مكافئة مكوَّنة من ثنائي موحِّد للتيار ، مكثف 'C يمثل سعة الصمام المتناثرة Stray Capacitance ومقاومة 'r تمثل التسريب في التيار كما بالشكل 7−10 أدناه . تمثل المقاومة r_d بالدائرة المكافئة مقاومة الانحياز الأمامي للثنائي ، بينما يمثل مصدر الجهد E_d جهد الانحياز العكسي للثنائي والذي يمثل جهد هارتري في الماغنترون .



الشكل 7−10 الدائرة المكافئة للماغنترون

من أجل الحصول على استقرارية أكبر في تردد الماغنترون تمّ تطويره لابتكار الماغنترون المحوري Coaxial Magnetron . في هذا النوع يتمّ توظيف غرفة رنّانة معيّنة كعنصر لتحديد التردد مما يمكن من الحصول على استقرارية في تردد الإشارة مع التغير في الحمل والتيار والحرارة . كما يمتاز الماغنترون المحوري عن الماغنترون ذو الفجوات بإمكانية التحكم في تردده ميكانيكياً عن طريق مكبس متحرك يغيّر من حجم الغرفة الرنّانة بواسطة محرك كهربي صغير . إلاّ أنّ مثل هذا الصمام يحتاج إلى مراعاة تخفيض درجة حرارته بعد إطفائه تدريجياً حتى لا ينحصر المكبس بداخل الغرفة نتيجة انكماشها المفاجئ .

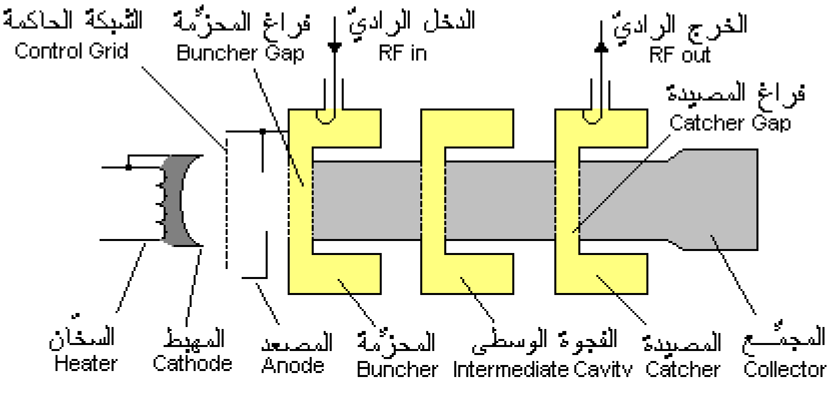
7 6 الكلايسترون

يعتبر الكلايسترون Klystron صمام قدرة من الأدوات الموجية خطيّة الشعاع Linear-Beam ذات الكفاءة العالية في نطاق الموجات المكروية . وهو من المكبرات التي تمتاز بمعامل تكبير عالي وقدرة قصوى كبيرة وكفاءة مرتفعة مقارنة بالأدوات الموجية الأخرى .

يحتاج الكلايسترون إلى جهود عالية جداً مقارنة بالصمامات الأخرى مثل الصمامات الفراغية والماغنترون وصمام الموجة الراحلة حيث لا تفوقه في ذلك إلا الصمامات العاملة بسرعات إلكترونية نسبية Relativistic مثل الجيروترون والأبيترون . كما يتصف الكلايسترون بسعة ترددية صغيرة لا تسمح بتغيير كبير في تردد الإشارة التي يعمل على تكبيرها . إضافة لذلك نجده ذا حجم كبير يزيد منه الحاجة إلى وجود دروع حوله تمنع تسرب الأشعة السينية التي قد تتولد به إلى خارج الصمام .

يتركب الكلايسترون كما يتضح من الشكل 7−11 أدناه من ثلاث مراحل هي مدفع الإلكترونات ، التردد الرادي ومرحلة المجمّع . يقوم مدفع الإلكترونات Electron Gun بإنتاج الإلكترونات من المهبط وتركيزها Focusing لتقليل الأثر الحراري الذي قد ينتج من احتكاكها بجدار الصمام ثمّ قذفها عبر الشبكة الحاكمة التي تتحكم في شدة التيار الإلكتروني إلى مرحلة التردد الرادي RF Section .

تشتمل مرحلة التردد الرادي على المصعد ذو الشكل الأسطواني والذي به ثلاث فجوات تتصل الأولى بخارج الصمام لإدخال الإشارة والأخيرة لإخراج الإشارة بعد تكبيرها وتمر الإلكترونات من خلال نفق بوسط المصعد . يمكن إدخال الإشارة أو إخراجها كموجة كهرمغنطيسية أو كتيار كهربي ، ويتمّ تحويلها من أو إلى تيار بواسطة حلقة من سلك معدني في حال عدم استخدام دليل موجة . يعمل المجمّع Collector على تجميع الإلكترونات الحرة المقذوفة بعد عبورها عبر المصعد المُجوَّف .



الشكل 7−11 تركيب الكلايسترون

عنـد مـرور الإلكترونـات بمرحلـة التـردد الـرادي عبـر الفجـوة الأولـى والتـي تسـمى بالمُحَـزِّمة Buncher ، يـتم تعـديل طاقـة الإلكترونـات بواسـطة المجـال الكهرمغنطيسـي لإشـارة الـدخل عاليـة التـردد . بعـد مرورهـا عبـر الفجـوة الوسـطى للمصـعد ، تميـل الإلكترونـات إلـى تحويـل طاقتهـا المسـتمدة مـن المجـال الكهربـي داخـل الصـمام إلـى مجال كهرمغنطيسي له نفس تردد إشارة الدخل وذلك عبر الفجوة الأخيرة والتي تسمى بالمصيدة Catcher حيث يتمّ تحويل جزء كبير من الطاقة إلى إشارة الخرج .

كمـا هـو متوقـع فـإنّ العلاقـة بـين كـل مـن تيـار الكلايسـترون والجهـد بـين المصـعد والمهبط علاقة غير خطيّة ، صيغتها الرياضية هي

$$I = K V^{3/2} \qquad 7\text{-} 5$$

حيث K معامل الصمام ، في حين أنّ العلاقة بين القدرة والجهد هي

$$P = K V^{5/3} \qquad 7\text{-} 6$$

نسبة لخطـورة استعماله وكبـر كلفتـه وحجمـه واحتياجـه لمصـدر تغذيـة خـاص متعـدد الجهـود ، ينـدر اسـتخدام الكلايسـترون فـي مرسـلات الـرادار شـائعة الانتشـار ويسـتخدم في عدد من أنظمة الاتصالات لاستقراريته وارتفاع قدرته . يوجد نوع من الكلايسترون يعمـل كـأداة ذاتيـة التذبـذب ذو كلفـة منخفضـة وجهـود تشـغيل أقـل مـن الكلايسـترون المكـبِّر يسـمى بكلايسـترون الانعكـاس الـلاإرادي Reflex Klystron والـذي يسـتخدم كمذبذب محلي في بعض مستقبلات الرادار القديمة .

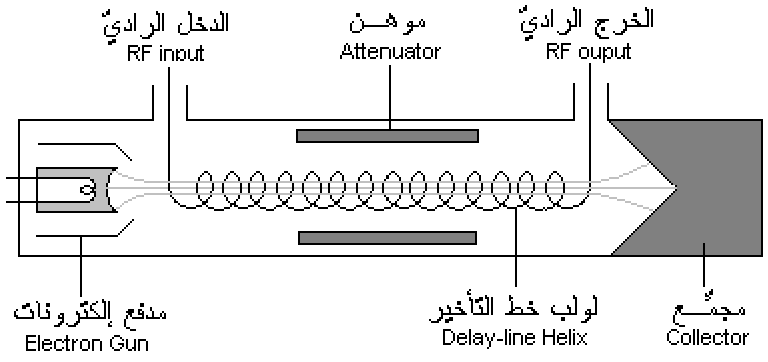
7 7 صمام الموجة الراحلة

يعتبـر صـمام الموجـة الراحلـة أو المتنقلـة Traveling Wave Tube صـمام قـدرة مـن الأدوات الموجيـة خطيّـة الشـعاع Linear-Beam ذو معامـل تكبيـر عـالي وسـعة ترددية كبيرة ولا يحتاج إلى جهود عالية مقارنة بالكلايسترون ، إلا أنّه ذو كفاءة أقل منه .

مثلمـا يتركـب الكلايسـترون ، يتركـب صـمام TWT مـن ثـلاث مراحـل هـي مـدفع الإلكترونـات ، قطـاع التفاعـل ومجمّـع الإلكترونـات كمـا بالشـكل 7−12 أدنـاه . يوجـد بداخل قطاع التفاعل سلك لولبي Helix يعمل كخط تأخير للموجة وتمرّ الإلكترونات

خلال لفاته أثناء عبورها القطاع . تدخل إشارة الدخل عالية التردد بواسطة طرف خط التأخير القريب من مدفع الإلكترونات وتخرج من الطرف الثاني بعد أن تقضي فترة زمنية أطول داخل مرحلة قطاع التفاعل بسبب السلك اللولبي . تكتسب الموجة خلال رحلتها عبر بالصمام طاقة من الإلكترونات المتحركة بسرعة نحو المجمّع مما يحدث تكبيراً مقدراً في الإشارة الراديّة .

إلى جانب استخدامه كمرسل مستقر في الرادار ونظم الاتصالات الفضائية ، يمتاز صمام TWT بخطية عالية ومعامل ضوضاء منخفض . لذلك كان يستخدم كمكبر قليل الضوضاء LNA بمراحل التردد الرادي بمستقبلات الرادار القديمة . تمّ تصميم صمام التويسترون Twystron ليجمع بين خواص كل من الكلايسترون وصمام الموجة الراحلة ليكون له كفاءة عالية وسعة ترددية كبيرة .



الشكل 7−12 صمام الموجة الراحلة

7 8 المعدِّلات النبضية

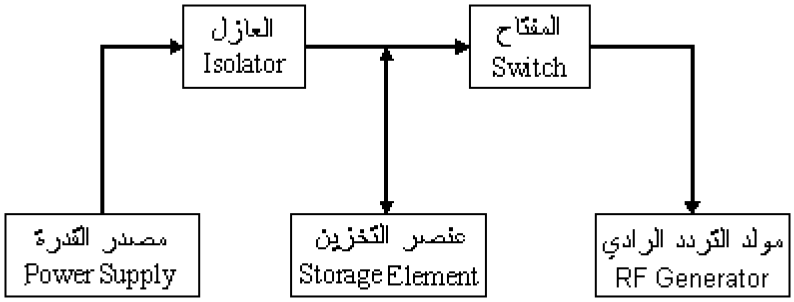
يعمل المعدِّل بمرسل الرادار النبضي على توفير إشارة نبضية ذات جهد عالي جداً تقوم بتشكيل نبضات التردد الرادي عالية القدرة المنتجة بواسطة مولِّد التردد الرادي دون حدوث تشويه نتيجة للتيار المسحوب .

رغم أنه توجد عدة أنواع من المعدّلات النبضية التي تستخدم في مرسل الرادار ، إلا أنها تشترك في استخدامها وسائل لتخزين الطاقة خلال فترة الاستقبال بالإضافة لمفتاح إلكتروني عالي القدرة لتفريغ الطاقة المخزونة عند الإرسال كما يتضح من

الشكل 7−13 . يجب أن يكون مصدر القدرة Power Supply بالتيار المباشر والمستخدم في المرسل ذا قدرة كبيرة كافية للحصول على قدرة الإرسال المطلوبة .

غالباً ما يستخدم الرادار المكروي مصدراً للإمداد بالطاقة (مولد أو محوِّل) ذا ثلاثة أوجه 3-phase بدلاً من وجه واحد وذلك لحصول على تيار مباشر لا يهبط إلى الصفر بعد التقويم . كما يستخدم مغيِّراً للتردد Frequency Converter لرفع تردد المصدر (من 50Hz إلى 400Hz) وذلك لتسهيل ترشيح التيار بعد التقويم وبالتالي الحصول على أقل مركبات ترددية ممكنة .

بالإضافة للتقويم والترشيح ، يشتمل مصدر القدرة على منظّم للجهد لضمان استقرار مطال النبضة عالية الجهد المنتجة بواسطة المعدّل . تحدث في دوائر المعدل تغيرات بمعدلات كبيرة في كل من الجهد والتيار عند الإرسال ، الأمر الذي يتطلب استخدام عازل Isolator لحماية مصدر التغذية وضمان عدم تأثر أدائه بتلك التغيرات السريعة .



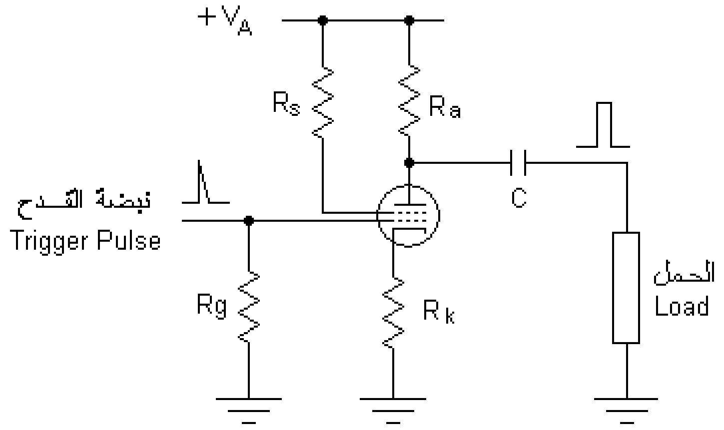
الشكل 7−13 مبدأ عمل المعدّل

تستخدم عدة أدوات إلكترونية كمفاتيح بالمعدّلات مثل الصمام الرباعي ، الثايرترون والترانزستور الحقلي . الثايرترون Thyratron هو الصمام المناظر للثايرستور Thyristor من أدوات الحالة الجامدة ويشابهه في وظيفته وإن اختلفا في مبدأ عمل كل منهما . الثايرترون صمام ثلاثي له مصعد ، مهبط وشبكة تحكم ومحاط بوعاء زجاجي أو خزفي Ceramic مملوء بغاز قابل للتأين مثل الهيدروجين المستخدم في الصمامات عالية القدرة أو مثل بخار الزئبق المستخدم في الصمامات ذات القدرات

المنخفضة نسبياً . يحتاج الصمام إلى نبضة قدح Trigger موجبة حتى يتأين الغاز فتعمل الأيونات الموجبة به على توصيل التيار بين المصعد والمهبط مما يصاحبه هبوط كبير في الجهد بينهما . يستمر الغاز في التأين حتى بعد اختفاء النبضة الموجبة إلى أن يهبط التيار المار بالصمام إلى قيمة منخفضة جداً فيختفي التأين وينقطع سريان التيار .

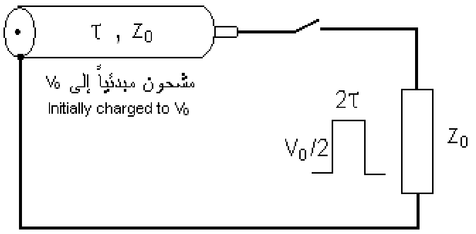
رغم تباين تركيبها ، إلا أنّه يمكن تقسيم المعدلات النبضية بصورة عامة إلى نوعين أساسيين [6] هما الصمام الصلب Hard-tube والنوع الخطّي Line-type . في معدلات الصمامات الصلبة لا يتمّ امتصاص كل الشحنة الكهربية المخزونة بواسطة الحمل إذ أنّ الصمام أقرب ما يستخدم كمكبر نبضي Pulsed Amplifier وليس كمفتاح إلكتروني .

يتمّ تسليط نبضة موجبة على الشبكة الحاكمة للصمام فيسري تيار مشبَّع عبره مسبباً انخفاضاً كبيراً ومفاجئاً في جهد المصعد كما يتضح من الشكل 7-14 . نتيجة لذلك الانخفاض في جهد المصعد ، يتمّ تفريغ الشحنة المخزونة بالمكثف عبر مولّد التردد الرادي والذي يشكّل حمل المعدّل دون وصول الجهد إلى الصفر مما يُبقي جزءاً من الشحنة بالمكثف . يتكرر شحن المكثف خلال فترة الاستقبال من مصدر التغذية بتيار منخفض كثيراًً عن تيار التفريغ وذلك عبر الحمل نفسه .



الشكل 7-14 معدّل صمام صلب

بخلاف معدّلات الصمامات الصلبة ، يتمّ في المعدّلات من النوع الخطي امتصاص كلّ الشحنة الكهربية المخزونة بواسطة الحمل . يأتي اسم هذا النوع من المعدّلات للتشابه في طريقة تخزين وتفريغ الطاقة التي تستخدم فيه مع طريقة تخزين وتفريغ الطاقة في خط النقل ذي الدائرة المفتوحة المبيّن في الشكل 7–15 . إذا ما كان زمن انتشار الموجة عبر الخط المشحون إلى جهد كهربي V_o يعادل τ ، فإنه إذا تمّ تفريغ شحنة الخط في حمل متوافق مع ممانعته المميزة Z_o ، فإنّ الجهد بين طرفي الحمل يكون على شكل نبضة مستطيلة مطالها $V_o/2$ وعرضها 2τ .



الشكل 7–15 فكرة المعدّل من النوع الخطّي

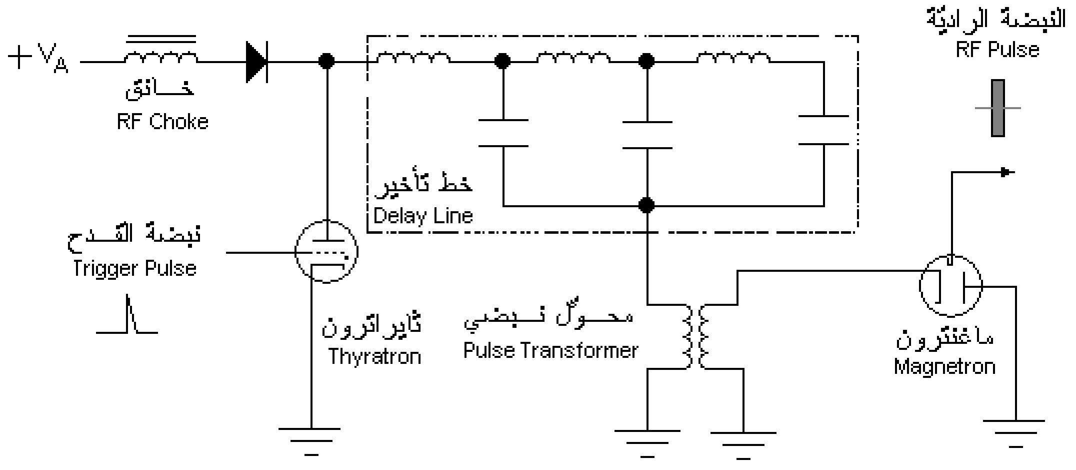
عملياً لا تستخدم خطوط النقل في تحقيق المعدّل وتستبدل بعدد من الملفات والمكثفات تقوم بتخزين الطاقة خلال فترة الاستقبال تعرف بشبكة تشكيل النبضة Pulse Forming Network أو بخط التأخير . الدائرة الإلكترونية بالشكل 7–16 لمعدّل من النوع الخطي يستخدم خط تأخير يتمّ شحنه عبر الملف الابتدائي للمحول عن طريق الثنائي وخانق التردد الرادي RF Choke واللذان يشكلان عازلاً لمصدر التغذية لحمايته .

يُستخدم المحول النبضي لرفع جهد نبضة خرج المعدّل ، في حين يُستخدم الثايرترون كمفتاح لتفريغ الشحنة عبره إلى الحمل . المحوّلات النبضية محوّلات مخصصة للتعامل مع النبضات القصيرة والحادة ، مثل نبضات الرادار ، وذلك لتقليل التشويه الذي قد ينشأ في إشارة خرج المعدل نتيجة للمغنطة المتبقية Residual Magnetism بالقلب الحديدي بعد اختفاء التيار . عادة ما تستخدم المحولات لربط المعدّل والحمل في النوع الخطي من المعدلات ، إلا أنها لا تستخدم في معدّلات الصمام الصلب .

خلال فترة الاستقبال ، يتم شحن خط التأخير بواسطة الثنائي وعبر الملف الابتدائي للمحول بمعدل تغير منخفض لا يسمح بتوليد تيار يذكر بالملف الثانوي ، بينما لا يمر تيار عبر الصمام غير المتأين . عند وصول نبضة الإشعال من مولّد النبضات بالرادار ، يتأين الصمام ويفرّغ شحنة الخط عبره مما تنتج عنه نبضة عالية الجهد بالملف الثانوي للمحول النبضي تعمل على تغذية مولِّد التردد الرادي فينتج نبضة جيبية ذات قدرة وتردد كبيرَين تتجه إلى الهوائي لإرسالها .

يعمل الثنائي بالدائرة على منع تفريغ الشحنة بمصدر التغذية ، بينما يمنع الخانق وصول الترددات العالية إليه . يستخدم في مثل دوائر المعدلات هذه ثنائي زينر Zener Diode موازياً للصمام وذلك لامتصاص القوة الدافعة الراجعة المتولدة بالملف الابتدائي للمحِّول .

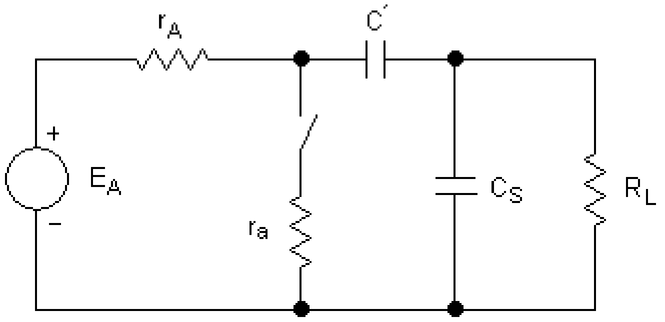
في كل المعدلات ، نجد أنّ نبضة الإشعال أو القدح Trigger Pulse القادمة من مولد النبضات هي التي تحدِّد زمن بداية إرسال النبضة ، في حين أنّ خواص خط التأخير أو شبكة تشكيل النبضة (أو سعة المكثف في حالة المعدل الصلب) هي التي تحدِّد عرض النبضة وبالتالي دقة القياس والتمييز في المدى .



الشكل 7–16 دائرة معدّل نبضي

يمكن تمثيل معدّل الصمام الصلب بدائرة مكافئة تشتمل على مفتاح مثالي على التوالي مع مقاومة مصعد r_a لتمثيل الصمام كما بالشكل 7–17. المقاومة R_L تمثل

الحمل في حين يمثل المكثف C_s السعة المتناثرة Stray Capacitance الناشئة من أجزاء دائرة الخرج المختلفة . يمثل E_A جهد مصدر التغذية بالتيار المباشر وتمثل المقاومة r_A مقاومته في حين يمثل المكثف 'C مكثف الربط مع الحمل . تؤثر كل من السعة المتناثرة للفات المحول وبقية أجزاء الدائرة بالإضافة إلى سعة الحمل غير الواردة على الدائرة المكافئة في شكل النبضة المنتجة حيث يتشوه غلافها ولا يكون مستطيلاً تماماً كما هو متوقع .

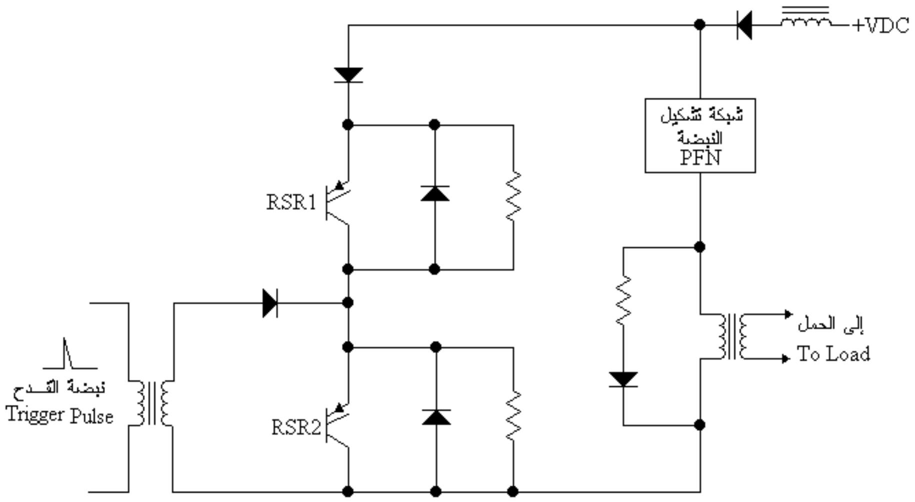


بالشكل 7−17 الدائرة المكافئة للمعدِّل

من أمثلة أدوات الحالة الجامدة المستخدمة في المعدّلات النبضية مقوِّم عكس التوصيل Reverse-switching Rectifier والذي يُستخدم بدلاً من الثايرستور SCR نسبة إلى العيوب المتعلقة بقفل وفتح الثايرستور .

بخلاف الثايرستور ثلاثي الأقطاب ، فإنّ RSR ثنائي القطب ويتمّ بدء توصيله للتيار بواسطة الارتفاع المفاجئ في الجهد بين مصعده ومهبطه وليس بواسطة نبضات القدح . يتواصل سريان التيار حتى هبوطه إلى مقدار أقل من تيار المَسك Holding Current ، مثلما في الثايرستور .

الشكل 7−18 أدناه يوضح معدل من النوع الخطي يستخدم في تكوينه مفتاحين RSR . يتمّ رفع جهد نبضة الإشعال بواسطة محول رافع للحصول على نبضة يتعدى معدّل تغير جهدها 15kV/µs تعمل على انهيار المفتاح RSR2 ، والذي يعمل بدوره على انهيار المفتاح RSR1 فتفرَّغ شحنة شبكة تشكيل النبضة عبر المحول لتنتقل الطاقة منه إلى الحمل .



الشكل 7-18 معدّل RSR

يستخدم الترانزستور الحقلي FET لتحقيق المعدِّل النبضي وذلك بتوظيف مصفوفات مشكَّلة من عدد من الترانزستورات لزيادة القدرة القصوى ورفع الاستمرارية Reliability . تمتاز هذه النوعية من المعدلات بخاصية التعطل التدريجي Fail Soft ، فلا يتعطل المعدل بتلف أحد عناصره ، ولكن يقلّ أداؤه تدريجياً إلى أن يؤثر ذلك على القدرة المنتجة بالمرسل بشكل واضح .

أسئلة وتمارين

1- اذكر خواص مرسل الرادار التي تؤثر في اختياره للعمل بنظام الرادار .

2- بالرسم وضّح التركيب الداخلي للماغنترون المحوري مع شرح طريقة عمله .

3- مع الشرح ارسم الدائرة المكافئة للماغنترون . اشرح المقصود بجهد هارتري مع رسم بياني توضيحي له .

4- اشرح دور شبكة تشكيل النبضة PFN في معدّل الرادار .

5- ارسم دائرة مرسل رادار كامل تحتوي على معدل يستخدم شبكة تشكيل النبضة وصمام ثايرترون يقوم بتعديل إشارة خرج ماغنترون عن طريق محول نبضي مع التوضيح على الرسم .

6- اشرح طريقة عمل الصمام الخماسي بالتفصيل .

7- دائرة مكبر جهد مقاومة دخلها 10MΩ وتستخدم صماماً ثلاثياً معامل تكبير التيار به $G_m = 10mA/V$ ومقاومة حمل مصعده $R_a = 10K\Omega$ ، فإذا كانت المقاومة الموصولة بالمهبط $R_k = 500\Omega$ ارسم الدائرة الإلكترونية كاملةً ثم أوجد معامل تكبير الجهد للدائرة .

8- وضّح العلاقات الرياضية بين كل من التيار والجهد والقدرة لصمام الكلايسترون ، ثمّ قارن بين مزايا وعيوب كل من الكلايسترون وصمام الموجة الراحلة .

9- مرسل يستهلك قدرة متوسطة 10kW ويعمل بدورة عمل 0.1% بكفاءة 40% ، أوجد القدرة القصوى المرسلة إذا كان فقد خط التوصيل والمزدوج 2dB وكسب الهوائي 32dB .

10- صمام كلايسترون يعمل في الظروف الطبيعية لعمله بجهد بين المصعد والمهبط مقداره 39kV ، أوجد كل من شدة التيار المار به والقدرة المستنفدة إذا كان معامل الصمام واحد .

الباب الثامن

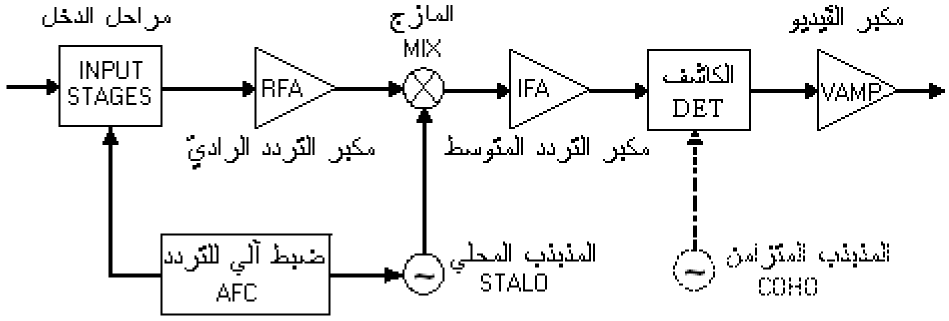
مستقبلات الرادار

1-8 خواص المستقبل

إنّ الدور الرئيسي لمستقبل الرادار هو التقاط و كشف نبضات الصدى القادمة من الأهداف في ظل وجود أنواع التداخل المختلفة من تشويش وضوضاء تأتي مصاحبة للإشارات وزخم ناتج عن وجود أجسام أخرى تشارك الأهداف المطلوبة نفس المجال .

كما سبق ذكره في الباب الثالث ، فإنّ المستقبل يعمل على تكبير الإشارات الملتقطة بواسطة الهوائي إلى مستوى يمكن التعامل معه . كما يقوم بإجراء العديد من المعالجات على الإشارة كتلك التي ورد تفصيلها في الباب الرابع من هذا الكتاب كالترشيح والتكبير اللوغريتمي والتفاضل والتحكم الزمني بالتكبير وتكامل النبضات وتثبيت معدل الإنذارات الكاذبة بالإضافة إلى أول مستويات الكشف وهي إزالة تعديل الإشارة لإنتاج نبضات الفيديو .

يمكن تمثيل تركيب مستقبل الرادار بالمخطط الصندوقي في الشكل 8−1 أدناه والذي يتضّح به تعديلات للمخطط السابق عرضه بالشكل 3−3 بحيث يضم المخطط مراحل الدخل التي تشمل المزدوِج ودوائر الحماية والتنغيم بالإضافة إلى المذبذبات المحلية والتحكم الآلي بالتردد .



الشكل 8−1 مستقبل الرادار

كما يتضح من الشكل فإننا اعتمدنا استخدام النوع السوبر هيترودااين من المستقبلات والذي يتمّ فيه تغيير تردد الإشارة الراديّة المستقبلة إلى تردد متوسط ثابت ومحدَّد لأي مستقبل . إلا أنّه توجد بعض المستقبلات التي بها أكثر من مُغيِّر ترددات Frequency Converter or Translator ، وبالتالي أكثر من تردد متوسط واحد . تضم مراحل الدخل عادة مرشح BPF بغرض تقليل الضوضاء والتداخل من القنوات المجاورة والتخلص من الإشارة الصورة Image Rejection ، وهي إشارة يمكن استقبالها من مصدر خارجي ويزيد أو يقل ترددها عن تردد الرادار بضعف التردد المتوسط للمستقبل .

يتمّ تمييز مستقبل رادار ما عن مستقبل آخر بالنظر إلى الخواص الفنية والفيزيائية لكل منهما والتي تتلخص بشكل عام فيما يلي :

1. الحساسية Sensitivity
2. الاختيارية Selectivity
3. معامل الضوضاء Noise Figure
4. السعة الترددية Bandwidth
5. المدى الديناميكي Dynamic Range
6. الاستقرارية في الطور Phase Stability
7. منع التداخل Interference Rejection
8. العزل والحماية Isolation and Protection

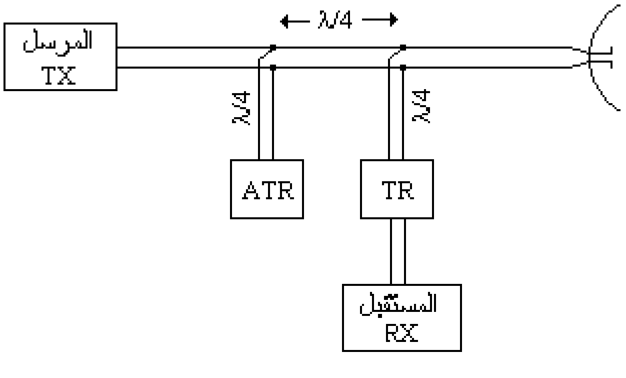
2-8 المزدوج

يمثل المزدوِج Duplexer ، أو مفتاح الهوائي Antenna Switch ، الوحدة المشتركة بين كلّ من مرسل ومستقبل الرادار النبضي والتي تعمل على عزل مستقبل الرادار عن دوائر الإرسال وحمايته من الإشارات عالية القدرة .

يستخدم مزدوج الرادار النبضي ذو القدرة القصوى العالية مُفرِغات الشرر الغازية Gas Dischargersكأدوات أساسية في تركيبه في حين تُستخدم المفاتيح الإلكترونية مثل ثنائيات بِن PIN Diodes في أنظمة الرادار ذات القدرة القصوى المنخفضة . ويقدر عزل المزدوج بين المرسل والمستقبل بنسبة القدرة القصوى للمرسل إلى القدرة الآمنة عند دخل المستقبل دون حدوث تلف بدوائره والذي يعادل

$$Isolation = P_t / P_{r\,(max)} \qquad 8\text{-}1$$

مثال لذلك رادار القدرة القصوى لمرسله 1MW وأكبر قدرة ممكنة عند مدخل مستقبله 2.5W يجب ألا يقل عزل المزدوج الذي يستخدمه عن 56dB . توجد عدة أنواع من المزدوجات تختلف في طبيعة تكوينها والنطاق الترددي الذي تصلح للعمل به . يعتبر المزدوج المتفرِّع [1] Branch-type من الأنواع الشائع استخدامها في الأنظمة المترية في نطاق التردد العالي جداً والذي يستخدم أجزاءً محسوبة الأطوال من الكوابل المحورية كما في الشكل 8−2 أدناه . تستخدم مفرغات الشرر لقصر الدائرة الكهربية عند الإرسال بفعل تأين الغاز الموجود بداخلها والتي يعتمد دور أي منها على الغرض منه ، إذ يمكن أن يكون مفرغ الشرر المعيّن مفتاح إرسال−استقبال TR Switch أو مفتاح عكس إرسال−استقبال ATR (Anti TR) Switch .



الشكل 8−2 المزدوج المتفرّع

في حالة الإرسال يتأين الغاز بالمفتاحين ويحدث بهما شرر فيعمل مفتاح TR كدائرة قصيرة تمنع وصول إشارة المرسل عالية الجهد إلى مدخل المستقبل ، ولأنّه يبعد عن خط النقل الرئيسي بمقدار ربع الطول الموجي فإنّه يظهر كدائرة مفتوحة

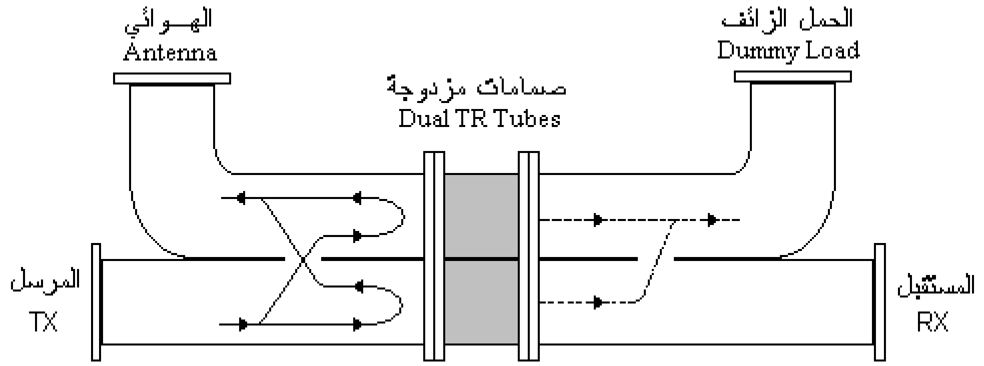
بالنسبة للخط وبالتالي لا يؤثر على الإشارة المرسلة في طريقها من المرسل إلى الهوائي . نفس الشيء ينطبق على مفتاح ATR فهو يبدو كدائرة مفتوحة بالنسبة لخط النقل الرئيسي لبعده بربع الطول الموجي عنه . لمعرفة المزيد عن المحوّل ربع الموجة واستخدام الخطوط المبتورة Stubs المفتوحة والمقصورة يستحسن الرجوع إلى مرجع في نظرية خطوط النقل .

أمّا في حالة الاستقبال فيكون المرسل معطلاً ولا يحدث شرر في أي من المفتاحين ، فيبدو المفتاح ATR كدائرة قصيرة عند خط النقل ومفتوحة عند نقطة التفرّع إلى المستقبل وبالتالي يمكن اعتبار المرسل غير موصول مع الخط وتمر إشارة الصدى القادمة من الهوائي إلى المستقبل دون المرسل .

يتضّح مدى اعتماد أداء هذا المزدوج على الطول الموجي للإشارة المرسلة وبالتالي نجد سعته الترددّية محدودة مما يقلل من المرونة في تغيير تردد الرادار . كما نجده لا يصلح للترددات الأعلى من النطاق المتري كالموجات المكروية والتي لا تُستخدم بها الكوابل لنقل القدرة العالية ، أضف إلى ذلك محدودية القدرة القصوى التي يمكنه التعامل معها .

من المزدوِجات عالية الأداء والعاملة في نطاق الموجات المكروية المزدوج المتوازن Balanced Duplexerوالذي يستخدم مقاطع من دليل الموجة . تعتمد فكرة عمل هذا المزدوج على استخدام وصلة هجينية Hybrid Junction بها شق قصير بالجدارين الرقيقَين لمقطعَي دليلَي الموجة الملتصقين كما يتضح من الشكل 8-3 أدناه .

تشكل الوصلة الهجينية المكونة للمزدوج رابطاً متجهاً Directional Coupler ، نسبة ربطه تعادل 3dB [1] . في حالة الإرسال تنقسم القدرة القادمة من المرسل بالتساوي في دليلَي الموجة عبر الشق الأول ، فيقوم كل من مفتاحي TR بالتأين وعكس القدرة الساقطة إلى الهوائي كما يتضح من الخطوط المتصلة والتي تمثل اتجاه القدرة المرسلة بالشكل . تتجه القدرة المتسربة عبر المفاتيح إلى الحمل الزائف Dummy Load بدلاً من ذهابها إلى المستقبل .



الشكل 8–3 المزدوج المتوازن

أما في حالة الاستقبال ، لا تتأين المفاتيح فتمر إشارة الصدى كاملة عبر المزدوج من الهوائي إلى المستقبل . تنقسم القدرة بالتساوي عند الشق الأول ، ولكن لتقدم الإشارة بزاوية طور مقدارها 90° عند عبور الشق تتراكم الطاقة في اتجاه دليل الموجة المتجه نحو المستقبل وليس الآخر المتجه نحو الحمل الزائف [2]. يمتاز المزدوج المتوازن بقدرة قصوى كبيرة مقارنة بالمزدوج المتفرّع وبسعة ترددية أكبر تصل إلى 10% من تردد الإشارة الرادارية .

مُفرِغات الشرر الغازية التي تعمل كمفاتيح في مزدوج الرادار ذي القدرة القصوى العالية هي عبارة عن صمامات مفرغة من الهواء ومملوءة بغاز سريع التأين عند القدرات الراديّة العالية . إلى جانب سرعة تأينها يجب أن تكون كذلك سريعة في فقد التأين Deionization لدى اختفاء القدرة الراديّة المنتجة بواسطة المرسل .

تُملأ تلك الصمامات عادة بغاز الأرغون لانخفاض جهد انهياره ولتطويل عمر تشغيل الصمام ، إلا أنّ استخدام الأرغون النقي يقلل من سرعة فقد التأين مما يجعل مفرغ الشرر غير ملائم للاستخدام للرادار قصير النبضة . يتمّ إسرّاع عملية فقد التأين بإضافة بخار الماء إلى الأرغون ، الأمر الذي يؤدي إلى تقليل استمرارية وعمر عمل الصمّام .

للحصول على صمام سريع وعالي الاستمرارية ، يُدمج مصدر إضافي للإلكترونات بداخل الصمام يعمل على انتشار بعض الإلكترونات الحرة بالصمام تساعد على التأين فور ظهور القدرة الراديّة . يعمل مصدر الإلكترونات هذا على المحافظة على

حياتها Keep-alive وهو عبارة عن مفرغ تيار مباشر ضعيف أو مصدر إشعاع نشط Radioactive .

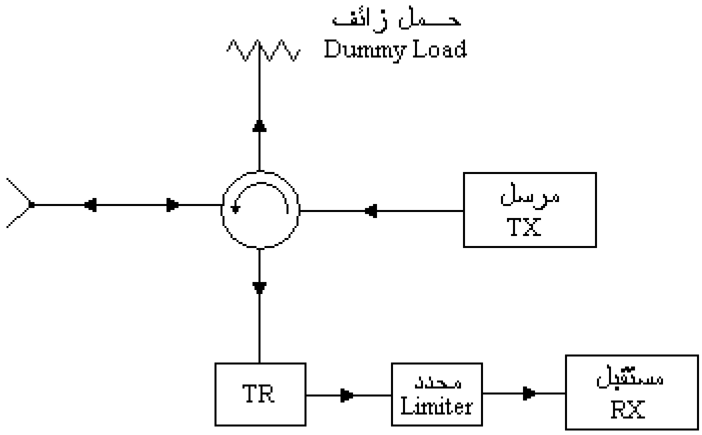
3-8 حماية المستقبل

تعمل مفاتيح TR التي تستخدم مفرغات الشرر على قصر الدائرة في حال وجود القدرة الراديّة العالية المنتجة في المرسل مما يصعب من وصولها إلى المستقبل عبر المزدوج ولكن لا يمنعه كلية . كذلك يحتاج المستقبل أيضاً إلى الحماية Protection من الإشارات القوية من المرسلات المجاورة أو إشارات الصدى المنعكسة من الأجسام القريبة للهوائي والتي قد تؤدي إلى تلفه أثناء فترة الاستقبال التي لا يعمل بها المرسل أو عند توقف الرادار عن العمل .

تتأثر مراحل دخل المستقبل بتلك الإشارات القوية أكثر من غيرها لا سيما المازج البلّوري الحسّاس الذي يستخدم في الأنظمة المكروية ويوضع داخل دليل الموجة لاستخلاص إشارة التردد المتوسط من الإشارة الراديّة المستقبلة وإشارة المذبذب المحلي . يستخدم غطاء معدني لإغلاق دليل الموجة القادم من الهوائي ليشكل دائرة قصيرة للإشارات في حال تعطيل الرادار عن العمل لفترة من الزمن .

تستخدم الثنائيات بأنواعها مثل ثنائي PN وثنائي PIN لإضعاف القدرة الراديّة المتجهة إلى المستقبل وذلك بدون تسليط جهد انحياز على الثنائيات في حال القدرة المنخفضة نسبياً . أما في حال القدرات العالية ، تستخدم إشارة إطفاء Blanking تأتي من وحدة التزامن لحظة الإرسال لتوفير انحياز أمامي للثنائيات لمنع الإشارة من الوصول إلى المستقبل .

تستخدم أدوات الفرايت Ferrite في تركيب كثير من المزدوجات وفي حماية المستقبلات بالرادار بديلاً عن مفرغات الشرر . يمتاز ثنائي الفرايت بسرعته العالية التي تصل إلى أقل من نانو ثانية وبعمر غير محدود ما لم يتمّ تخطى القدرة القصوى له . إلاّ أنّ تلك الأدوات ذات أحجام كبيرة مقارنة بأدوات الحماية الأخرى وبها فقد كبير في القدرة ، الأمر الذي يتطلب تبريد تلك الأدوات بالهواء أو الماء .



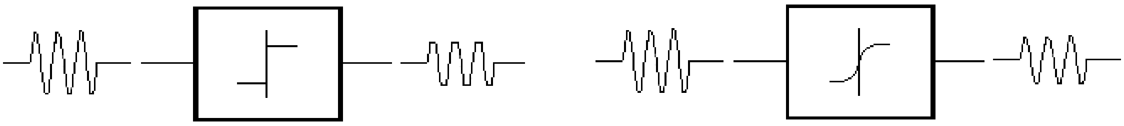
الشكل 8−4 الدوّار

يُعد الدوّار Circulator من أدوات الفرايت الشائعة الاستخدام في الرادار المستمر والنبضي على السواء حيث يغني عن استخدام المزدوج . كما يتضح من الشكل 8−4 أعلاه ، فالدوار عبارة عن أداة ذات ثلاثة منافذ أو أربعة يوصل أحدها بحمل زائف . يوفِّر الدوّار عزل لا بأس به بين المرسل والمستقبل ، إلا أنّ المستقبل يحتاج إلى الحماية الإضافية بدرجة أكبر عند استخدام الدوّار . بصورة عامة ، ليس العزل بين منافذ المرسل والمستقبل فقط هو الذي يحدّد مقدار القدرة المتسربة إلى المستقبل ، ولكن نجد أنّ عدم توافق ممانعة الهوائي في حالة الإرسال تؤدي إلى انعكاس جزء من القدرة المرسلة من الهوائي إلى المستقبل مما يزيد من مقدار التسريب . يمتاز الدوّار بالعمر الطويل والتماسك الميكانيكي إلى جانب تفوقه على المزدوج بالسعة الترددية الكبيرة .

8-4 المحدِّدات

إضافة إلى إمكانية إتلاف دوائر دخل المستقبل ، يمكن أن تؤدي الإشارات المستقبلة القوية إلى تشبُع Saturation مراحل التكبير المختلفة بالمستقبل مما يؤثر في خطيّة المكبرات وبالتالي يؤدي إلى حدوث تشويه بالإشارة . كما يمكن أن تقود إشارة الدخل الكبيرة المكبر إلى الدخول في حالة لا يمكنه الرجوع منها وتؤثر في أدائه وكفاءته مثل سحبه لتيار مباشر أكبر أو عدم استقرار خواصه وبالتالي إمكانية تولُّد إشارات أخرى في خرجه .

تعتبر مراحل الفيديو من أكثر مراحل المستقبل قابلية لحدوث التشبع نسبة لكبر الإشارة المارة بها وصغر ترددها إذ تحتاج إلى زمن أطول للرجوع إلى أدائها الطبيعي مقارنة بمكبرات التردد المتوسط . لتقليل احتمال التشبع ، يستخدم مستقبل الرادار محدِّداً Limiter واحداً أو أكثر لمطال الإشارة الرادارية . يمكن أن يتمّ التحديد في آخر مراحل التردد المتوسط قبيل إزالة التعديل حيث يفضل استخدام محدّد ناعم Soft Limiterقبل الكشف وذلك لضمان تناسب الإشارة المكتشفة مع قوة إشارة الصدى ، لا سيما عند استخدام كاشف الغلاف . أما في حالة استخدام كاشف الطور ، فيفضل الاستفادة من محدِّد حاد Hard Limiter للحصول على إشارة في دخل الكاشف تعتمد فقط على طور الإشارة الرادارية دون المطال كما بالشكل 8-5 أدناه .



الشكل 8-5 المحدّد الحاد والناعم

للمحدِّد ثلاثة عوامل هامة هي كفاءة أدائه في وجود الضوضاء ، انتظام مطال إشارة الخرج وانتظام طورها . كفاءة أداء المحدّد في وجود الضوضاء يعبر عنها مدى نجاح المحدد في تحديد الإشارات المدفونة داخلها وبالمحافظة على نسبة الإشارة إلى الضوضاء بين الدخل والخرج . قام قاردنر[2] Gardner بعمل تقريب مفيد لإيجاد علاقة بين نسبة الإشارة إلى الضوضاء في خرج المحدد مع نظيرتها في الدخل كما يلي

$$SNR_o = SNR_i \ (1 + 2\ SNR_i) / (4/\pi + SNR_i) \qquad 8\text{-}2$$

وعندما تكون تلك النسبة في الدخل أكبر كثيراً من واحد $SNR_i \gg 1$ نحصل على

$$SNR_o = 2\ SNR_i \qquad 8\text{-}3$$

وحين تقل بكثير عن واحد $SNR_i \ll 1$ نحصل على

$$SNR_o = \pi/4\ SNR_i \qquad 8\text{-}4$$

تساعد المحدّدات في زيادة المدى الديناميكي للمستقبل وهو مدى إمكانية تعامل المستقبل مع الإشارات القوية والضعيفة في نفس الوقت ، ويقدر بالفرق بين مطال أقوى إشارة لا تتلف المستقبل ولا تشبِّع دوائره ومطال أقل إشارة مكتشفة . لذا فإنّ المدى الديناميكي يتأثر بما يلي :

- أقل إشارة مكتشفة MDS للمستقبل وهي إشارة الدخل التي تعطي نسبة إشارة إلى الضوضاء عند مخرج المستقبل تعادل واحداً
- أقصى انحراف مسموح به في أداء المستقبل
- نوع الإشارة الرادارية من حيث طبيعة الأهداف الموزّعة أو النقطية والتداخل ذو النطاق العريض Wideband Interference

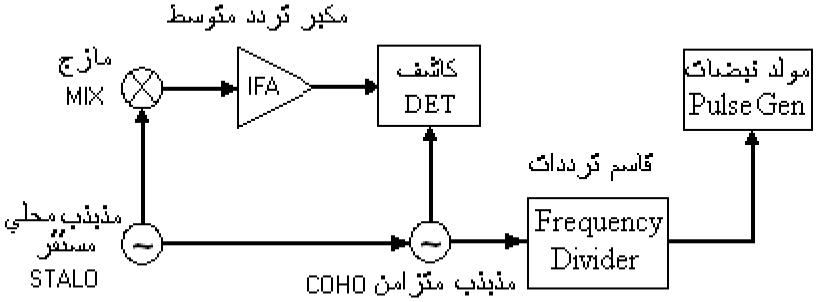
عدم الضبط الصحيح للمدى الديناميكي لمستقبل الرادار يجعله معرّضاً للتداخل بنوعيه ؛ المقصود وغير المقصود ، والذي غالباً ما يؤدي في مجمله إلى التشبع والزيادة في الحمل . يفضل الرجوع إلى الباب الرابع لمعرفة المزيد عن أهمية المدى الديناميكي .

5-8 المذبذبات المحلية

يستخدم مستقبل الرادار السوبر هيتروداين عدة مذبذبات في تركيبه إذ يستخدم مذبذباً محلياً أو أكثر لتغيير تردد الإشارة المستقبلة إلى التردد أو الترددات المتوسطة . كما نجد المذبذب المتزامن للكشف المتزامن بواسطة كاشف الطور بالإضافة إلى مولّد نبضات التزامن الأساسية بالرادار . تزداد الحاجة إلى استقرارية كل من مطال وطور المذبذب المحلي في الأنظمة المتزامنة والتي تعتمد في عملها على المعلومات الدوبلرية المضمّنة بالإشارة المستقبلة .

المذبذب الرئيسي في مستقبل الرادار هو مذبذب جيبي ذو تردد يفوق أو يقل عن تردد المرسل بمقدار التردد المتوسط . يعرف هذا المذبذب في بعض من المراجع

بالمذبـذب المحلـي المسـتقر Stable Local Oscillator وتختصـر STALO . أمـا المذبذب الجيبي الثاني والمستخدم في الكشف المتزامن ويعادل تردده التردد المتوسط للمسـتقبل فيعـرف بالمذبـذب المتـزامن Coherent Oscillator وتختصـر COHO . بالنسبة لمولّد نبضـات التزامن أو الإشـعال فهو مولّد نبضـي تـردده هو تـردد تكـرار نبضـة الرادار PRF والذي يحدّد المدى الأقصى للرادار دون حدوث التباس في القياس . ليس لنبضـة مولد النبضـات هذا أي شكل موجي بعينـه غير أنـها يجب أن قصـيرة وبها حافة حادة كالنبضـة المستطيلة أو المثلثية .

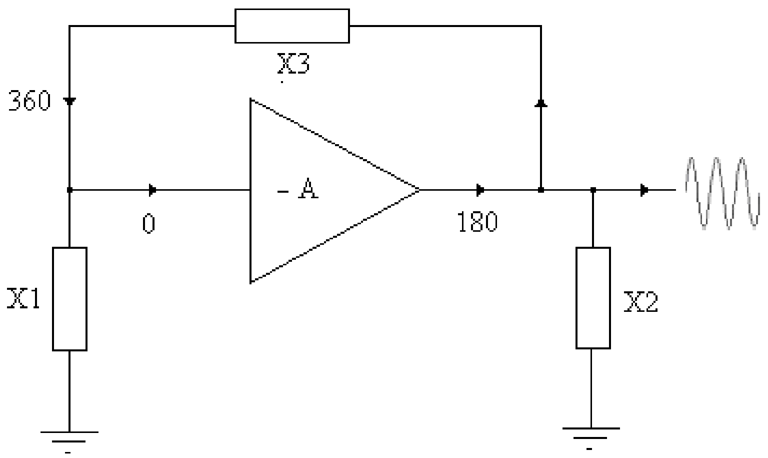


الشكل 8-6 المذبذبات المحلية بالرادار

فـي معظـم الأنظمـة المتزامنـة يسـتخدم المذبـذب المحلـي المسـتقر لإنتـاج الإشـارة المرسلة قبل تكبيرها بواسطة المرسل من النوع مكبر القدرة ، وذلك إلى جانب دوره في تغيير التردد بالمستقبل وضبط تزامن كل من المذبذب المتزامن ومولّد نبضـات التزامن الأساسـية كمـا بالشـكل 8-6 أعـلاه . تعتمـد إمكانيـة تغييـر تـردد الـرادار علـى كفـاءة واستقرارية هذا المذبذب بين الترددات المختلفة ، ويتوفر لـه ذلك بوجود وحدة للتحكم الآلي بضبط التردد AFC .

المذبـذب هـو عبـارة عـن مكـبّر يـتمّ تصـميمه للتذبـذب باسـتخدام التغذيـة العكسـية الموجبـة Positive Feedback وفق شروط معينـة . لضـمان إنتـاج الإشـارة الجيبيـة من المذبذب يشترط أن يكون معامل تكبير المكبر كافياً وأن تتساوى زوايا طور كل من الإشـارة المغذاة عكسياً وإشـارة دخل المكبر . بمعنـى أوضـح يجـب أن تكـون محصـلة الإزاحـة في الطـور بسـبب المكبر ودوائر التغذيـة من أي نقطـة وبـالرجوع إليـها تعـادل 360° أو إحدى مضـاعفاتها .

إذا ما تمّ استخدام مكبر عاكس للطور مثل المبين في الشكل 8-7 أدناه بحيث تتوفر إزاحة مقدارها °180 بين الخرج والدخل ، فإنّ شرطي التذبذب يكونان معامل التكبير الكافي للمكبر ومساواة إشارة مفاعلة Reactance كل من الدخل والخرج المشار إليهما في الشكل X2 , X1 ومخالفتها لإشارة مفاعلة دائرة التغذية العكسية X3 . يعتمد تردد الإشارة الجيبية المستقرة بعد المرحلة العابرة على قيم الملفات والمكثفات التي تحقق الشروط أعلاه .

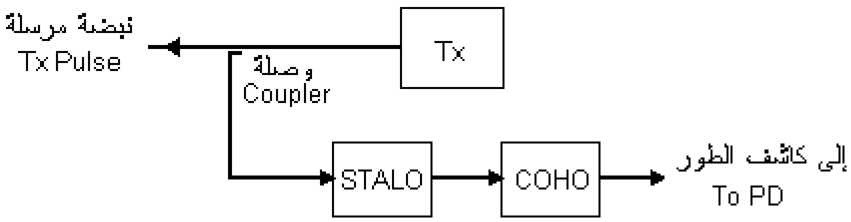


الشكل 8-7 الدائرة العامة للمذبذب

مما سبق إذا كانت كل من X1 , X2 محاثتَين (ملفين) وكانت X3 سعة (مكثفاً) ، فإننا نحصل على ما يعرف بمذبذب هارتلي Hartley ، أما إذا كانتا مكثفين وكانت X3 ملفاً فنحصل على مذبذب كولبيت Colpitt . إلاّ أنّ استخدام الملفات والمكثفات في تحديد التردد يلائم المذبذبات البسيطة التي يتأرجح ترددها بصورة شبه مستمرة كما في أجهزة الاستقبال الرخيصة ولكنه لا يلائم الأنظمة التي تحتاج إلى استقرارية عالية في التردد كالرادار . يأتي عدم الاستقرار في تلك المذبذبات من اعتماد التردد فيها على خواص المكبر وعلى استقرار تلك الخواص مع التغير في درجة الحرارة ، إضافة للتذبذب في جهد مصدر التغذية مما يسبب انجرافاً في التردد Frequency Drift .

إذا كان المرسل يستخدم أداةً عالية القدرة ذاتية التذبذب مثل الماغنترون ، تؤخذ عينة من إشارة الخرج بواسطة رابط Coupler ذي توهين كبير لتعمل على ضبط

طور كل من إشارة المذبذب المحلي وإشارة المذبذب المتزامن حتى تكونا متزامنتين مع الإشارة المرسلة .



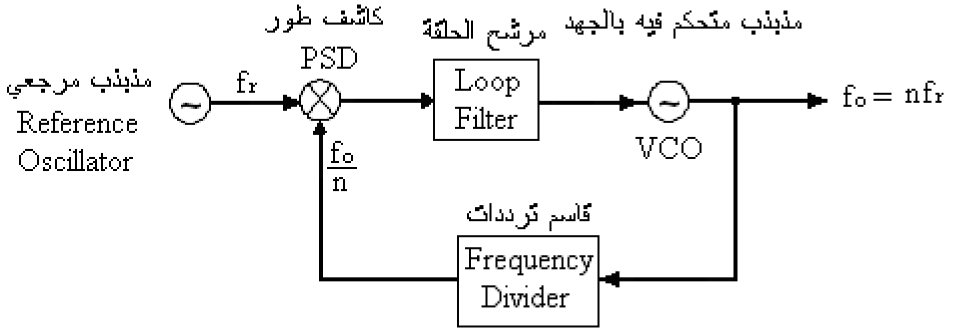
الشكل 8-8 التحكم بواسطة المرسل

لزيادة الاستقرارية ، تستخدم بلورة الكوارتز في دوائر المذبذبات لاتّصافها بمعامل جودة Quality Factor عالي جداً يعمل على تقليل انجراف التردد . إلا أننا نجد في المقابل أنّ مذبذب البلورة Crystal Oscillator غير مرن في تغيير التردد ، الأمر الذي لا يناسب الأنظمة التي تحتاج إلى تغيير ترددها لا سيّما العسكرية منها ومما يستدعي توفير مذبذب له نفس الاستقرارية العالية مع إمكانية تغيير تردده عند الطلب .

يستخدم التحكم الآلي في التردد AFC لضمان استقرار تردد كل من الإشارة المنتجة في مولد التردد الرادي بالمرسل وإشارة المذبذب المحلي بالمستقبل . يتمّ استخدام مذبذب البلورة كمذبذب مرجعي للتحكم في تردد مذبذب يُتحكم فيه بالجهد VCO بعد مقارنة ترديديهما وذلك باستخدام كاشف طور حساس يتبعه مرشح LPF. تشكل منظومة التحكم هذه حلقة طور مغلقة PLL تعمل على مساواة تردد المذبذب المراد التحكم فيه بتردد المذبذب المرجعي وبفرق ثابت في الطور .

للحصول على إمكانية تغيير تردد المذبذب بصورة رقمية ، يتمّ إدخال قاسم ترددات قابل للبرمجة داخل الحلقة المغلقة فنحصل على ترددات تعادل مضاعفات التردد المرجعي اعتماداً على نسبة قسمة الترددات . الشكل 8-9 أدناه يوضح تلك المنظومة والتي تعرف بمركّب أو مؤلّف الترددات Frequency Synthesizer . تعتمد استقرارية التردد في مركب الترددات بصورة كبيرة على كل من خواص مرشّح الحلقة واستقرارية

المذبـذب المرجعـي . فـي حـين تعتمـد سـرعة اسـتجابة المنظومـة لتغيـر نسـبة قسـمة الترددات على خواص مرشح الحلقة وسرعة استجابة المذبذب المتحكم فيه بالجهد .



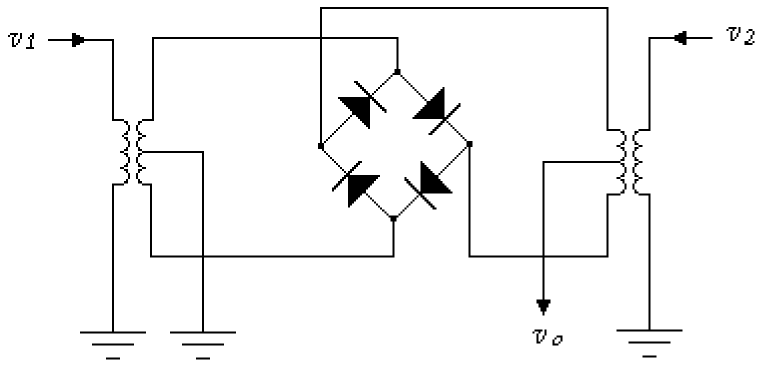
الشكل 8−9 مركِّب الترددات

6-8 المازجات والكاشفات

يُشـار فـي كثيـر مـن المراجـع [2] إلـى أي دائـرة بالمستقبل ككاشـف طـور إذا مـا كانـت بإشارة خرجها معلومة الطور فقط دون المطـال ، وككاشـف متزامن عنـد اشـتمال إشـارة الخرج الطور والمطال ، وكمازج في حال اشتمالها كل من الطور والمطال والتردد .

نجـد أنّ هنالـك عـدة دوائـر تماثليـة ورقميـة تسـتخدم لتحقيـق المازجـات والكاشـفات المتزامنة وكاشفات الطور . يستخدم ضارب الإشارة Signal Multiplier للحصـول على حاصل ضرب إشارتين طورياً ويستخدم في مزج الإشارات التماثلية ليعطي خرجاً به إشارة تردد الفرق وإشارة تردد المجموع مثلما يتضح من المعادلة 2-3 . من أبـرز تلك المازجات المعدّل المتوازن Balanced Modulator الذي يستخدم ثنـائيين كمفاتيح إلكترونية ، والكاشـف الحلقي Ring Detector والموضّح في الشـكل 8−10 أدناه والـذي يستخدم أربعة ثنائيات .

يمتاز المازج الأخير باستجابة جيبية وبخلو إشارة خرجه من مركبة التردد الأساسـي عند تعامله مع الإشـارات الجيبيـة ، فـي حين تكون استجابته مثلثيـة فـي حالـة الإشـارة المرّبعـة Square Wave . لضـمان أدائـه ، تسـتخدم ثنائيـات متماثلـة مـن نـوع -Hot carriers سريعة الفتح والغلق مع محولاّت متوازنة ذات سعات ترددية كبيرة .

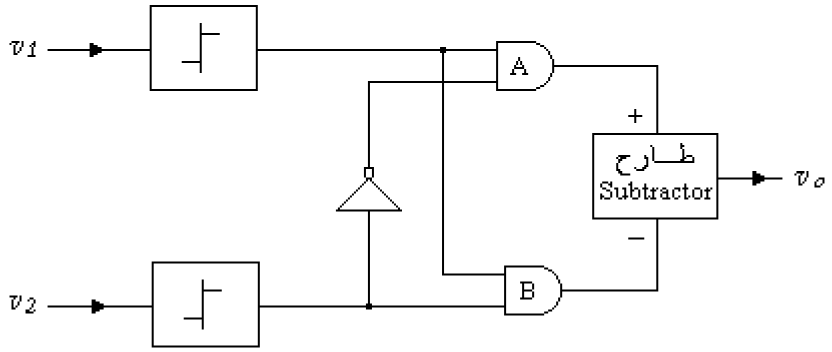


الشكل 8−10 المعدّل المتوازن

كثيراً ما يستخدم الترانزستور لتحقيق المازج لا سيما في تغيير التردد الإشارة الراديّة إلى التردد المتوسط كما يتضح في دائرة المستقبل الشكل 8−12. تعتمد فكرة عمل الترانزستور كمازج على إدخال إشارة الدخل الأقل جهداً إلى دائرة القاعدة ، بينما تدخل الأخرى على دائرة المشع .

يتعامل الترانزستور مع الإشارة الصغيرة كمكبر في هيئة المشع المشترك Common Emitter بينما يتعامل مع الأخرى في هيئة القاعدة المشتركة Common Base . لعدم خطية الترانزستور ، تتولد بالخرج عدة مكونات ترددية من بينها التردد المتوسط والذي يتم فرز إشارته بواسطة دائرة الرنين المكونة من المكثف والملف المتوازيان .

من الكاشفات التي تحتوي عناصر تماثلية ورقمية في دوائرها ذاك الذي يعرف بكاشف طور التطابق Coincidence Phase Detector ذو الاستجابة المثلثية . إحدى تلك الدوائر المحقِّقة للكاشف كتلك المبيّنة في الشكل 8−11 أدناه والتي تحتوي محدّدين وبوابتين AND وعاكس بالإضافة إلى طارح تماثلي . نجد أنّه عندما يكون لكل من الإشارتين v_1 , v_2 نفس الطور In-Phase ، فإنّ البوابة B تسجل التطابق لنصف الوقت في حين تسجل البوابة A عدم التطابق مما ينتج عنه في الخرج أقصى إشارة سالبة ممكنة . أمّا عندما تكونان متعامدتين طورياً Out of Phase ، فتتكون الحالة العكسية وينتج في الخرج أكبر إشارة موجبة ممكنة . يمكن تحقيق نفس الكاشف أدناه باستخدام بوابة XOR ولكننا نحصل على مركبة تيار مباشر في خرج البوابة ليست ملائمة لكثير من تطبيقات كاشف الطور .



الشكل 8−11 كاشف التطابق

7-8 دائرة المستقبل

حتى يتم الربط بين أجزاء المستقبل وتتبع مسار الإشارة من خلاله ، يعرض الشكل 8−12 والموجود بنهاية هذا الباب دائرة إلكترونية كاملة بسيطة تمثل مستقبل رادار من نوع السوبر هيترودايين .

دائرة الرنين المكونة من المكثف C1 والملف L1 تمثل مرحلة الدخل والمنغم Tuner لاختيار تردد الإشارة المطلوبة . الخط المتقطع الواصل بين المكثف المتغير C1 والمذبذب STALO يوضح أن هنالك ربطاً ميكانيكياً مع دائرة المذبذب المحلي (أو إلكترونياً مع مركب الترددات) ، وذلك لضمان تغيير الترددين بحيث يظل الفرق بينهما بمقدار التردد المتوسط للمستقبل .

يمثل الترانزستور Q1 مكبر التردد الرادي والذي يستحب أن يكون مكبراً قليل الضوضاء LNA في حالة الترددات المكروية حيث تكون ضوضاء النظام أكبر من الضوضاء المحيطية Ambient Noise . أما في الترددات المنخفضة ، فلا نحتاج لمثل ذلك المكبر لارتفاع مستوى الضوضاء المحيطية مقارنة بضوضاء النظام System Noise . نفس الأمر ينطبق على رادار التتبع الذي يستخدم تقنيات المسح الميكانيكي لقياس زاوية اتجاه الهدف لتصحيح اتجاه شعاع الرادار ، وذلك بسبب الضوضاء المحيطية الناشئة عن المسح .

تستخدم دائرة المستقبل المذكورة الترانزستور Q2 كمكبر للإشارة الرادية وكمازج للإشارات وتستخدم الترانزستور Q3 كمكبر لإشارة التردد المتوسط . عادة يكون

المكبر الأخير من عدة مراحل وليست مرحلة واحدة وذلك لزيادة الحساسية وتحسين الاختيارية . الثنائي D1 يمثل كاشف الغلاف أما الثنائي D2 فنحتاجه لتفريغ شحنة مكثف الربط C10 ولا نحتاجه في حالة الربط بمحول .

الدائرة المكونة من المكثفين C12 ، C13 والملف L5 تمثل مرشح لتمرير الترددات الدنيا LPF لترشيح إشارة الفيديو . كما يُستخدم مكثف الربط C14 لتمرير الإشارة إلى مكبر الفيديو الذي يمثله الترانزستور Q4 . لا بد من أن يكون مكثف الربط هذا ذا سعة كبيرة حتى لا تتأثر المكونات الترددية المنخفضة للإشارة بممانعته والتي تزيد بانخفاض التردد .

مكبر الفيديو المستخدم في هذه الدائرة في هيئة المجمع المشترك أو تابع المشع Emitter Follower من أجل الحصول على مقاومة خرج صغيرة . إذا كان مكبر الفيديو من عدة مراحل ، يجب مراعاة استخدام مكثفات ربط ذوات سعات كبيرة أو ربطها مباشرة Direct Coupling للحصول على السعة الترددية اللازمة لنبضات الفيديو عريضة النطاق . يجب في دوائر المبين تصحيح قطبية نبضة الفيديو إذا كانت معكوسة ، كوجوب أن تكون سالبة لدى وصولها مهبط مبين PPI التقليدي .

تستخدِم هذه الدائرة مطال إشارة الفيديو المكتشفة للتحكم الآلي بكسب مراحل التردد المتوسط وزيادة المدى الديناميكي للمستقبل ، كما سبق شرحه في الباب الرابع . يستفاد من الشحنة السالبة التي تظهر بالمكثف C12 لتعديل جهد خط التحكم الآلي بالكسب AGC Line ، وبالتالي معامل كسب المكبر . غالباً ما تحتاج إشارة AGC إلى تكبيرها بواسطة مكبر خاص بها قبل تمريرها إلى خط AGC وذلك لرفع استجابة المستقبل للتغيرات الصغيرة في جهد إشارة الفيديو . كما يجب أن تكون لحظية الاستجابة IAGC لقصر نبضات الرادار وارتفاع معدل التغير في مطال إشارة الفيديو لا سيما مع الأهداف النقطية .

أسئلة وتمارين

1 - اشرح كيفية التخلص من الإشارة الصورة Image Rejection في مستقبل الرادار .

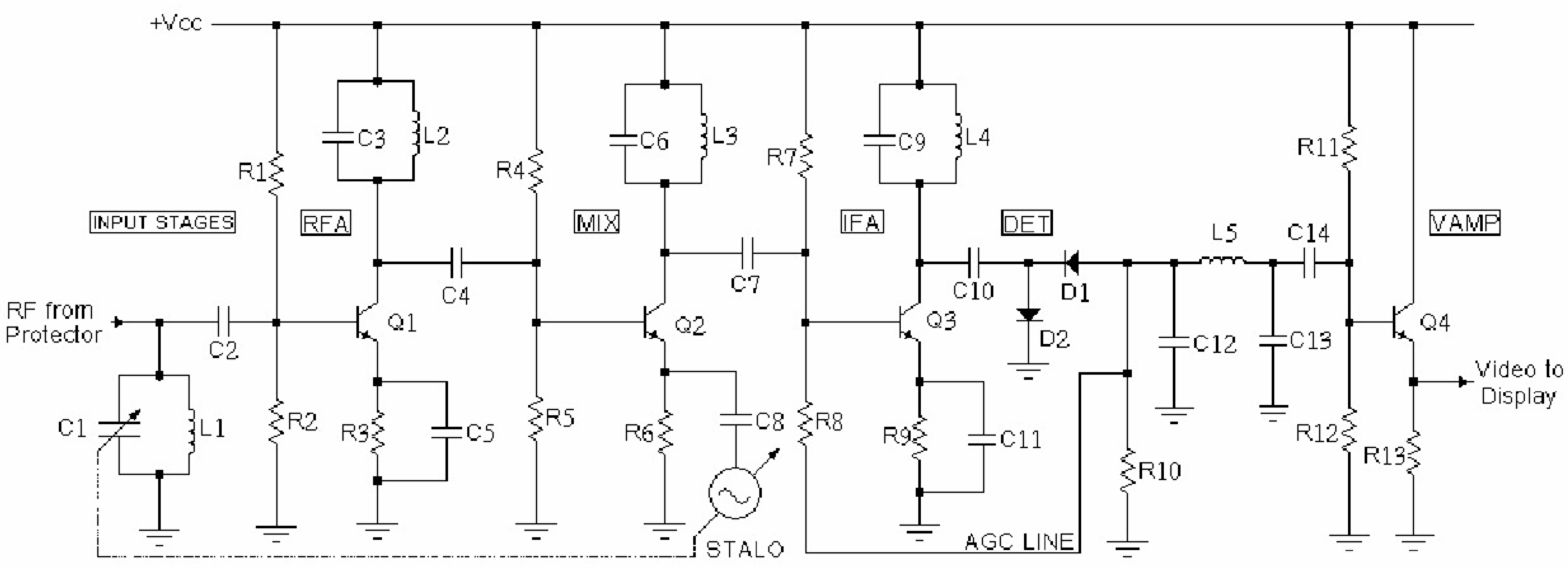
2 -اشرح دور المحدّد في مستقبل الرادار . بالمعادلات وضّح علاقة قاردنر مع شرح الحالات الخاصة . ما المقصود بالمدى الديناميكي للمستقبل ؟ اذكر العوامل التي تؤثر به .

3 -بالرسم اشرح طريقة عمل المزدوج المتفرّع Branch-type بالتفصيل . مزدوج متفرّع يعمل برادار متري تردده 150MHz ، أوجد طول خط النقل الرئيسي به بين نقطتي تفرع مفتاحي TR ، ATR . إذا كانت الممانعة الوصفية للخط 50Ω أوجد بعد أقرب نقطة تفرع من الهوائي عنه إذا كان الهوائي متوافقاً مع خط النقل . إذا كان خط النقل أعلاه عديم الفقد ومحاثته تعادل 35µH/m ، أوجد كل من معامل توهينه ومعامل طوره ومعامل انتشاره مع ذكر الوحدات .

4 -بالرسم أشرح طريقة عمل حلقة الطور المغلقة . مؤلف ترددات يستخدم حلقة الطور المغلقة PLL ، ما هو طول كلمة التحكم Control Word لقاسم الترددات به إذا كان قادراًً على إنتاج 512 تردد ولأي وحدة تدخل ؟

5 -عدِّد أسماء المذبذبات المحلية بمستقبل الرادار ودور كل منها . هل عددها محدَّد لكل المستقبلات ؟ وضّح .

6 -في الدائرة الإلكترونية في الشكل 8-12 أدناه ، اشرح دور كل من الثنائي D2 والمكثف C14 .



الشكل ٨-١٢ دائرة المستقبل

الباب التاسع

الرادار الثانوي

9-1 نظام التعـارف

رغم أنّ ظهور الرادار قد مكّن الإنسان من كشف ورصد الأهداف الطائرة والسفن التي لا يمكن رصدها بالعين المجردة ، إلاّ أنه لم يمكّنه من تحديد هوية الهدف وإذا ما كان يعتبر هدفاً صديقاً أو عدوّاً .

تمّ ابتكار أنظمة لتحديد الصديق من العدو Identification Friend or Foe أو التعارف خدمة للأغراض العسكرية . كان الهدف الأساسي لتلك الأنظمة التفريق بين الطائرات التابعة للمستخدم أو الحليفة له من جهة والطائرات المخترقة للمجال الجوّي الخاص به من جهة أخرى . تزداد أهمية التعارف أثناء توجيه الطائرات الاعتراضية Interceptors الصديقة نحو الطائرات المغيرة .

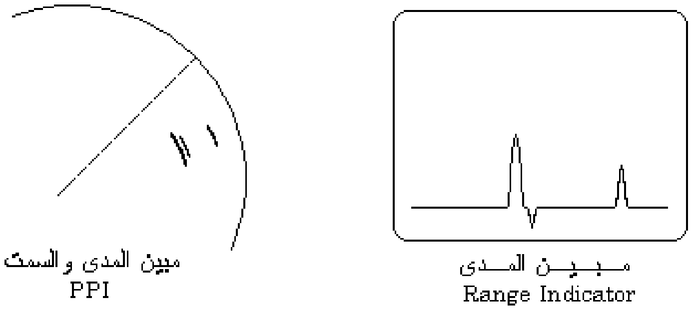
تتكوّن منظومة التعارف IFF من جزءين هما ؛ جهاز التعارف الأرضي وجهاز الإجابة المحمول بواسطة الطائرة الصديقة . يقوم جهاز التعارف بإرسال إشارات لا سلكية يقوم الجهاز المحمول بالرد عليها لتحديد هويته والتعريف عن تبعيته .

من أقدم أنواع أنظمة التعارف ذلك الذي يعتمد على إشارة الرادار المرسلة تجاه الطائرة أو السفينة الصديقة . جهاز الإجابة المحمول بالطائرة أو السفينة عبارة عن مُعيد Repeater يعمل على إعادة إرسال النبضة الرادارية فتظهر الطائرة الصديقة على شاشة الرادار بصورة أقوى مقارنة بالأهداف الأخرى . إلاّ أنّ تلك الأنظمة تعاني من عدم الاستقرار لاعتمادها على قوة الإشارة المستقبلة غير الثابتة بالإضافة لعدم التوافق مع ترددات أنظمة الرادار المختلفة .

تطوّرت أنظمة التعارف بإضافة قناة إرسال مستقلة عن الرادار وبتردد مختلف عن تردده ، تقوم بإرسال إشارات استفسار Interrogation على شكل نبضات إلى كل

الأهداف داخل مجال الرادار . عند استقبال جهاز الإجابة المحمول أو المُجيب Transponder لإشارة الاستفسار ، يقوم بالرد عليها للتعريف عن الطائرة التي تحمله .

نسبة لتزامن إشارة الاستفسار المرسلة مع إشارة الرادار ، تظهر النبضة المستقبلة من المجيب قرب نبضة الصدى المنعكسة من الهدف على مبيّن المدى والسمت . كما تظهر نبضة الإجابة Reply على مبين المدى كنبضة سالبة بالقرب من نبضة الصدى الموجبة كما بالشكل 9-1. يستخدم نظام مشابه في التوجيه الأرضي للصواريخ المضادة للطائرات حيث يظهر صدى كل من الهدف المراد إسقاطه والصاروخ الموجّه على نفس الشاشة ، الأمر الذي يساعد في مرحلة التوجيه اليدوي قبل التحوّل إلى التوجيه الآلي . لاحقاً ، يقوم حاسب آلي بإنتاج أوامر التوجيه وإرسالها إلى الصاروخ بمعلومية كل من موقعه وموقع الهدف المعادي .

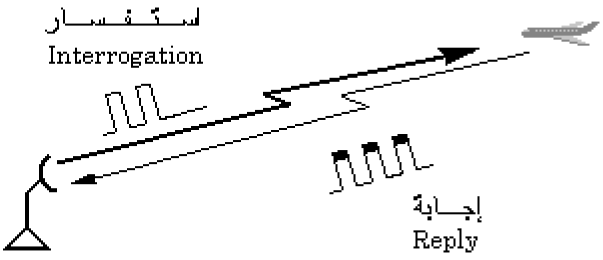


الشكل 9-1 نبضة الإجابة على المبيّنات

2-9 نظام الرادار الثانوي

تطورت نظم التعارف العسكرية بحيث تكون قياسية وذات كفاءة عالية ودقة أفضل في القياس خدمة لكل من الأغراض العسكرية والمدنية . رغم التشابه في المهام ، تمّ تخصيص تسمية التعارف IFF للأنظمة العسكرية في حين يعرف النظام القياسي المدني بالرادار الثانوي . تأتي تسميته بالرادار لاتّباع النظام لنفس فكرة قياس مدى الهدف المستخدمة في الرادار الأوّلي وذلك بحساب زمن تأخير إشارة الإجابة عن إشارة الاستفسار .

يستخدم رادار الاستطلاع الثانوي Secondary Surveillance Radar القياسي ، ويختصر SSR ، تردداً قياسياً لإشارة الاستفسار يعادل 1030MHz وتردداً قياسياً لإشارة الإجابة يعادل 1090MHz . بخلاف الرادار الأوّلي الذي يقوم بإرسال نبضات معدّلة متتالية تتكرر بتردد تكرار النبضة ، فإنّ إشارة الاستفسار المرسلة من الرادار الثانوي تتضمن زوج من النبضات معدلتَين وبينهما فترة زمنية محددة . ترسل النبضتين دورياً بتردد ثابت يسمى مجازاً بتردد تكرار النبضة PRF تماشياً مع مثيله في الرادار الأوّلي . بعد استقباله الاستفسار ، يرسل المُجيب الإجابة نحو الرادار المستفسر على شكل إشارة رقمية Digital معدّلة تتضمن الرد على الاستفسار كما بالشكل 9-2 .



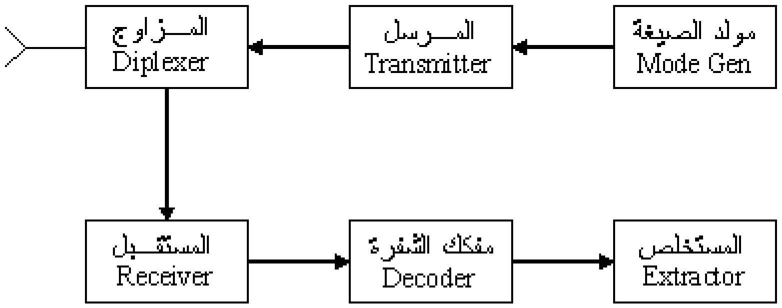
الشكل 9-2 إشارات الرادار الثانوي

يمكن تقسيم كامل أجزاء نظام الرادار الثانوي إلى ثلاث وحدات أساسية هي :

- المستفسر Interrogator بالرادار
- المجيب Transponder بالطائرة
- المستجيب Responser بالرادار

الشكل 9-3 يبيّن المخطط الصندوقي لرادار الاستطلاع الثانوي المكوَّن من المستفسر والمستجيب . يعتبر الرادار الثانوي رادار استطلاع ثنائي البعد 2D تختلف أشكال الهوائيات المستخدمة فيه حسب التقنيات المستخدمة لتشكيل شعاع الكشف ، إلاّ أنها تتفق في ضرورة تضييق الشعاع في المستوى الأفقي وتقليل الإشعاع الجانبي قدر الإمكان . غالباً ما يستخدم الرادار الثانوي هوائي مصفوفة طور مكوّن من عدد من عناصر الإشعاع المتوازية ودون استخدام أي عاكس .

كما في الهوائي العلوي في الصورة التي بالشكل 9-4 ، توضع عناصر الإشعاع رأسيةً لتوفير زاوية شعاع ضيقة في المستوى الأفقي تحسن من دقة قياس السمت ومن التمييز فيه . في الجانب الآخر نجد أنّ زاوية الشعاع كبيرة نسبياً في المستوى الرأسي لتوسيع مجال الكشف مما أكسب هذا النوع من الهوائي اسم المنفذ أو الفتحة الرأسية الكبيرة LVA .



الشكل 9-3 تركيب الرادار الثانوي

في حالة الإرسال ، يعمل المُزاوِج Diplexer على توزيع الإشارات القادمة من المرسل على عناصر الإشعاع النشطة في الهوائي حسب تصميم الهوائي . إشارة الاستفسار القادمة من المرسل عبارة عن نبضات جيبية ذات قدرة عالية نسبياً في حدود واحد إلى اثنين كيلو واط . يلاحظ انخفاض القدرة المرسلة مقارنة بالقدرة العالية المطلوبة في حال الرادار الأوّلي وذلك لدور المجيب في إنتاج إشارة الإجابة وأثر ذلك في زيادة المدى . أمّا عند الاستقبال ، فيقوم المزاوج بدمج الإشارات المستقبلة بواسطة عناصر الإشعاع وتمريرها إلى المستقبل الذي يعمل على تكبير ومعالجة الإشارة المستقبلة واستخلاص إشارة فيديو التعارف .

يقوم مولّد صيغة الاستفسار Mode Generator بتعديل الفترة الزمنية بين نبضتَي الإرسال حسب الغرض من الاستفسار وبإحدى الصيغ القياسية ، بينما يعمل مفكّك الشفرة على حل شفرة إشارة الإجابة المستقبلة بعد معالجتها في المستقبل وإرسالها إلى مستخلص البيانات . في الباب السادس تحدثنا عن مستخلص البقع في الرادار الأوّلي للحصول على البيانات الراداريّة عن الأهداف . بالمثل يعمل مستخلص البيانات Radar Data Extractor في الرادار الثانوي على تحليل المعلومات الواردة إليه وتجهيز

البيانات الرادارية لعرضها بالمبيّن المركب أو لإرسالها عبر قنوات الاتصال إلى مراكز المراقبة والسيطرة . عندما تشتمل منظومة الاستطلاع على رادارَين أوّلي وثانوي معاً PSR / SSR ، يستخدم الرادار الثانوي نبضات تزامن الرادار الأوّلي لضبط تزامن إرساله معه . يستقبل موحِّد بقع [8] Plot Combiner واحد بمستخلص البيانات الرادارية كلاً من إشارتَي خرج الرادارَين ليعطي بيانات رادارية موَّحدة لها بنية بيانات قياسية كالتي وردت في الباب السادس .

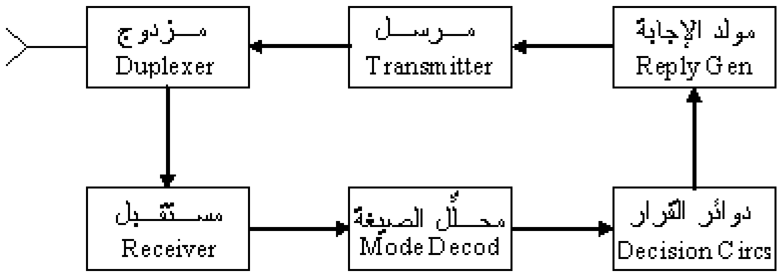
الشكل 9–4 هوائيان لرادار أوّلي وثانوي

3-9 نظام المجيب

يستقبل المجيب المحمول إشارة الاستفسار من رادار الاستطلاع الثانوي بصيغة محددة ، وعند ذلك يقوم بالرد عليه بعد إجراء عدة معالجات تتعلق بتحديد الغرض من الاستفسار ، الموافقة على الرد وتجهيز المعلومة المطلوبة .

يتركب نظام المجيب من الوحدات الموضّحة بالمخطط الصندوقي بالشكل 9–5 أدناه . يستخدم المجيب هوائياً واحداً لكلّ من الاستقبال والإرسال ويتصل بكلٍّ من المرسل والمستقبل عن طريق المزدوِج Duplexer . الهوائي المستخدم من النوع غير المتجه Omni-directional ، وذلك حتى تُستقبل الاستفسارات من أي رادار في أي اتجاه ويُرد عليها . تصل إشارة الاستفسار النبضية بتردد 1030MHz إلى المستقبل فيعمل على تكبيرها ومعالجتها وإزالة التعديل المطالي بها ، في حين يقوم المرسل

بتعديل إشارة الإجابة الرقمية بتردد 1090MHz ويرفع قدرتها إلى الحد اللازم لوصولها إلى الرادار في حدود عشرات أو بضع مئات الواط .



الشكل 9-5 تركيب المجيب

يقوم محلّل صيغة الاستفسار بتحديد الغرض من الاستفسار حسب الفترة الزمنية بين النبضيين المستقبلتين من الرادار . تختص دوائر القرار بتحديد صلاحية الاستفسار للرد عليه أو عدمه والسماح بإنتاج المعلومة المستفسر عنها من لوحة المفاتيح والعدادات أو من حاسوب التحكم المحمول بالطائرة . قد تكون المعلومة تختص بهوية الطائرة أو ارتفاعها أو أي معلومات أخرى تفيد في مراقبة الطائرة وتوجيهها من مركز المراقبة والسيطرة أو مركز التحكم بالحركة الجوّية أو من برج المطار المجاوِر . يختص مولِّد الإجابة بتشفير إشارة الإجابة بصورة معلومة للرادار وإعدادها بشكل نبضي إلى المرسل لتعديلها وإرسالها .

كما ذُكر آنفاً ، يقيس الرادار الثانوي مدى الهدف منه اعتماداً على زمن ذهاب نبضتَي الاستفسار ووصول إشارة الإجابة . إلا أنه يحدث تأخير في إنتاج إشارة الإجابة بواسطة المجيب بعد وصول النبضة الثانية للاستفسار إليه ، وذلك لحاجته لفك صيغة الاستفسار وتقرير الإجابة ثمّ تشفيرها وإرسالها إلى الرادار . لتصحيح الخطأ في قياس المدى الناتج عن ذلك التأخير ، تمّ الاتفاق على جعل تأخير المجيب في الرد قياسياً ويعادل $3 \pm 0.5\mu s$ حتى يتمكن الرادار من إجراء التصحيح اللازم . إذا كان للسفينة أو الطائرة التي تحمل المجيب مستفسراً لاعتراض الأهداف الأخرى ، تُستخدم إشارة منه لمنع المجيب من الرد على استفساره .

4-9 صـيغ الاسـتفسار

توجد عدة صيغ قياسية للاستفسار بعضها مدني وبعضها عسكري يقوم الرادار بالإرسال بإحداها في كل مرة بتعديل الفترة الزمنية بين نبضتي الاستفسار . يتوالى الاستفسار ، أو الاعتراض Challenge ، من الرادار بصورة متواصلة في كل الاتجاهات بتردد تكرار النبضة بصيغة واحدة أو بدمج الصيغ Mode Interlacing مع بعضها بصورة متكررة لتوفير قدر أكبر من بيانات الهدف .

توجد عدة صيغ للاستفسار بجانب الاستفسار عن الهوية المدنية أو العسكرية أبرزها الارتفاع الذي قد لا يتوفر لرادار الاستطلاع الأوّلي ثنائي البعد ، ويستفاد في ذلك من قياس الطائرة لارتفاعها بمجسات الارتفاع Altimeters المحمولة بالطائرة . كما يمكن الاستفسار عن معلومات أخرى تتعلق بالهوية أو التعريف مثل طراز الطائرة ومهمتها وتبعيتها ورقم السرب Squadron . كما يمكن الاستفسار عن معلومات أخرى من مجسات الطائرة المختلفة كالسرعة وبيانات المحرِّك ومخزون الوقود بالطائرة .

الصيغة Mode	الفترة Interval	الغرض Purpose
1	3 µs	التعريف العام General Identification
2	5 µs	التعريف الشخصي Personal Identification
3/A	8 µs	التعريف العسكري/المدني Military/Civil
B	17 µs	التعريف المدني Civil Identity
C	21 µs	الارتفاع Altitude
D	25 µs	غير محدد Undefined

القائمة 9-1 صيغ الاستفسار القياسيّة

القائمـة 9-1 أعـلاه تعـرض أكثـر صـيغ الاستفسـار العسـكرية والمدنيـة القياسـية استخداماً وتحـاذي أي منهـا الفتـرة الزمنيـة بـين نبضـتي الاستفسـار المخصصـة لهـا بالإضافة للغرض من الاستفسار . أمّا بالنسبة لعرض النبضة ، فإنّ عرض أي من نبضتي الاستفسار ثابت ويعادل 0.8µs . يرمز لصيغ الاستفسار القياسية العسكرية بالأرقام ، في حين يرمز للصيغ القياسية المدنية بالحروف .

رغم أنّ الصيغ العسكرية قياسية ذات فترات زمنية معروفة ، إلاّ أنّ الغرض من اثنين منها سري Confidential وهما Mode 1 للتعريف العام والصيغة Mode 2 للتعريف الشخصي . تشترك الصيغتان العسكرية Mode 3 والمدنية Mode A في تعريف الهوية العسكرية والمدنية ، في حين تستخدم الصيغة Mode B للتعريف المدني فقط . كذلك تستخدم الصيغة Mode C للاستفسار عن الارتفاع البارومتري للطائرة ، في حين نجد أنّ الصيغة المدنية Mode D غير محددة وتستخدم للطيران المحلي حسب الطلب أو تركها للاستخدام الدولي مستقبلاً .

كل الصيغ الواردة في القائمة 9-1 ، عدا الصيغتان Mode B ، Mode D فتستخدم لقسم من أنظمة التعارف العسكري تعرف بالطراز-10 (SIF) Mark-X القياسي ذو خاصية الهوية الاختيارية Selective Identification Feature ، والمطور من الطراز-10 التقليدي .

كذلك يوجد الطراز-12 Mark-XII والذي يستخدم بالإضافة للصيغ أعلاه الصيغة العسكرية Mode 4 ، والتي توفر تأمين للاتصال بين كل من الرادار والمجيب باستخدام التشفير Cryptography لكل من إشارة الاستفسار والإجابة . ويتمّ في وقت إعداد هذا الكتاب تطوير الطراز-12 إلى الطراز-12أ Mark-XIIA وذلك بإضافة الصيغة Mode 5 ، والتي توفر تقنيات اتصال متقدمة تحسّن من سلامة البيانات ومقاومة التشويش .

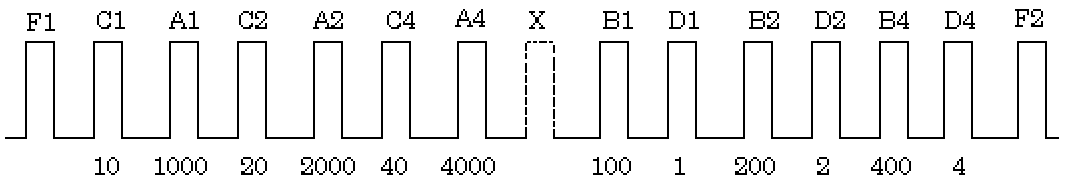
في الجانب المدني ، تمّ تطوير الرادار الثانوي بإضافة صيغة الاختيار Select أو Mode S ويستخدم عدة نبضات استفسار بدلاً من نبضتين ، وذلك بهدف توفير

تعريف أو عنوان متميز Distinct Address لكل طائرة دون الطائرات الأخرى ورفع كفاءة السلامة الجوّية . بعض الدول لا تستخدم الأنظمة القياسية العسكرية أعلاه بل تستخدم أنظمة خاصة بها ، مثل النظامين الروسييَّن كريمني Cremney المستخدم في السابق وبارول Parol المستخدم حالياً .

5-9 إشارة الإجابة

ترسل إشارة الإجابة الرقمية من المجيب طراز−10 القياسي ذو خاصية الهوية الاختيارية إلى الرادار كنبضات معدّلة ، يقوم المستقبل بإزالة تعديلها الرقمي لتخرج على شكل إشارة فيديو رقمية ثنائية تتكوّن من آحاد وأصفار .

بما أنّ الاتصال بين المجيب والرادار من النوع غير المتزامن ، ترسل المعلومات بإشارة الإجابة على شكل إطارات Frames متتابعة . يبدأ الإطار بالنبضة F1 تتبعها اثنتا عشرة نبضة عرض كل منها0.45µs وبفاصل زمني 1.45µs لكل منها . ترمز هذه النبضات إلى المعلومة المضمنّة ثمّ ينتهي الإطار بالنبضة F2 كما بالشكل 9−6 أدناه .



الشكل 9−6 إشارة الإجابة

النبضة X غير مستخدمة ومحجوزة للاستخدام المستقبلي ، في حين تستخدم نبضات مضمون الإجابة الاثنتا عشرة لتعطي 4096 شفرة مختلفة . تُقسَّم النبضات إلى أربع مجموعات عددية ABCD حيث A الرقم ذو الدلالة العظمى MSB وتمثله ثلاث نبضات $A_4A_2A_1$. بالمثل تُمثل باقي المجموعات بثلاث نبضات حيث لكل مجموعة ثمانية احتمالات ممكنة . لذلك نجد أنّ النظام العددي الثماني Octal والذي تمثله الأعداد الصحيحة من صفر إلى سبعة يستخدم لتمثيل محتوى كل مجموعة عددية .

تمّ ترتيب مواضع النبضات الثلاث لكل مجموعة من المجموعات العددية الأربع دون تجاور بغرض توزيع الأثر الزمني للتداخل عليها بالتساوي . تنفرد الإجابة على الصيغة Mode 1 بأن بها خمس نبضات فقط عرض كل منها 0.45µs بفاصل زمني 2.9µs وتمثلها مجموعتان عدديتان فقط هما A ، B (لا توجد B3) . كم لا تُستخدم النبضة D1 بالإجابة على الصيغة Mode C .

قامت المنظمة الدولية للطيران المدني ICAO بتحديد الشفرات التي يستخدمها المجيب للرد على كل صيغة استفسار معيّنة . كما قامت بحجز شفرات محددة لبعض الحالات الخاصة مثل حالة الطوارئ Emergency والتي شفرتها 7700 وحالة الاختطاف Skyjack وشفرتها 7500 . كما تستخدم الشفرة 7600 في حال فشل الاتصال Communication Failure لكل من التعارف أو الرادار الثانوي ، في حين تخصص الشفرة 7777 العسكرية للطائرات الاعتراضية في حالة الاشتباك الجوّي مع العدو .

6-9 إلغاء الإشعاع الجانبي

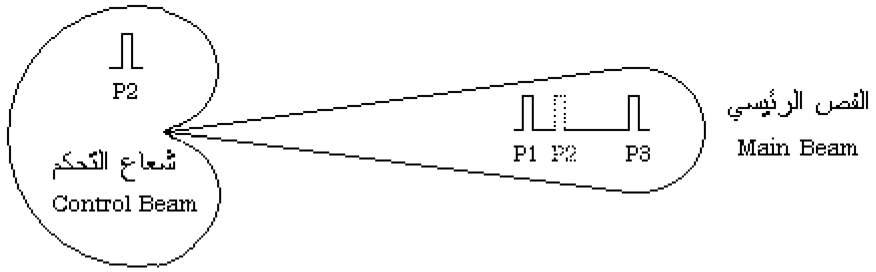
من نظرية الهوائيات وعند رسم شكل الإشعاع نجد أنّ للهوائي إشعاع جانبي تمثله الفصوص الجانبية Side-lobes . يعمل مصمم الهوائي على تضييق الفص الرئيسي وزيادة كسبه مع تقليل الفصوص الجانبية قدر الإمكان ، إلا أنه لا يمكنه التخلص منها نهائياً الأمر الذي يؤدي إلى حدوث التباس وخطأ في قياس زوايا اتجاه الأهداف من الرادار .

بالنسبة للرادار الأوّلي ربما تكون الإشارات المستقبلة من الفصوص الجانبية ضعيفة مقارنة بالمستقبلة داخل الفص الرئيسي ، أمّا بالنسبة للرادار الثانوي فإنه يلتقط ردوداً من أهداف خارج فصه الرئيسي لا يمكن تمييز إشاراتها القوية من بين الإشارات المطلوبة .

تسمى هذه الردود بالردود الكاذبة False Replies وتعرف كذلك بالثِمار Fruits ، وتعمل على رفع معدّل الإنذارات الكاذبة حيث تظهر الأهداف على شاشة الرادار

بعدة زوايا مختلفة . كحل بسيط لتقليل تلك الردود ، يمكن تصميم أو ضبط المجيبات لتعمل بحساسية منخفضة حتى لا تتأثر بإشارات الاستفسار الضعيفة القادمة من الفصوص الجانبية الأمر الذي يقلل من مدى كشف الرادار .

كحل جذري لتلك المعضلة ، فقد تمّ ابتكار نظام إلغاء الفصوص الجانبية للمستفسر Interrogator Side-lobe Suppression ويختصر ISLS للتخلص من الردود الكاذبة ولزيادة دقة القياس في زاوية اتجاه الهدف . أضيفت نبضة ثالثة بين نبضتَي الاستفسار لها نفس المطال والعرض وتتبع النبضة الأولى بعد فترة زمنية ثابتة مقدارها 2μs لكل صيغ الاستفسار . يقوم الرادار الثانوي بإرسال زوج النبضات P1 ، P3 بعد تعديلهما عبر الفص الرئيسي من شعاع الهوائي ، بينما يرسل نبضة التحكم P2 عبر شعاع التحكم المشكّل خصيصاً لنظام ISLS كالمبيّن بالشكل 9−7 أدناه .



الشكل 9−7 نظام ISLS

تعتمد فكرة عمل نظام إلغاء الإشعاع الجانبي في كون أنّه في استطاعة المجيب تمييز إذا ما كان يستقبل إشارات الاستفسار من داخل الفص الرئيسي أم من أحد الفصوص الجانبية وذلك بمقارنة مطالات النبضات الثلاث الواصلة إليه . إذا وصلت نبضتَي الاستفسار أقوى من نبضة التحكم فإنّ ذلك يعني وجود المجيب داخل الشعاع الرئيسي للرادار وبالتالي يقرر الرد .

أمّا في حال وصول أي من النبضتين بمطال أقل من مطال نبضة التحكم فإنّ ذلك يعني أنّ المجيب خارج الشعاع الرئيسي للرادار وبالتالي لا ينتج إشارة إجابة . بالإضافة إلى إزالة الالتباس في قياس الزاوية ، نجد أنّ نظام ISLS يزيد من دقة قياس زاوية اتجاه الهدف لدرجة كبيرة مقارنة بما نحصل عليه من الرادار الأوّلي .

يمكن تشكيل كل من الشعاع الرئيسي وشعاع التحكم باستخدام نظام أحادي النبضة Monopulse بصورة مشابهة لما بالشكل 9–7 والذي يستخدم هوائي من نوع مصفوفة الطور مثل المبين في الشكل 9–4 . تتصل عناصر الإشعاع بمصفوفة الطور مع مزاوج الرادار بثلاثة كوابل محورية لإنتاج عدة أشعة أولية ، تعرف بشعاع الجمع Σ وشعاع الفرق Δ بالإضافة إلى شعاع التحكم Ω تتركب لتشكيل الشعاع الرئيسي وشعاع التحكم .

يتميز هذا النظام بدقة عالية جداً في قياس السمت تصل مع وجود نظام ISLS إلى 0.088° ، والتي تعادل نبضة سمت واحدة ACP كما يشار إليها في حقل السمت ببنية بيانات الطيران المدني القياسية لإرسال البيانات الرادارية في الباب السادس من هذا الكتاب .

نسبة لارتفاع كلفة النظام أحادي النبضة ، تستخدم بعض أنظمة الرادار الثانوي هوائياً مدمجاً في هوائي الرادار الأوّلي المصاحب بحيث يُستخدم عاكسه الباربولي لتشكيل الشعاع الأساسي للمستفسر . كما تستخدم مشعات أخرى لتشكيل شعاع التحكم ليختلف شكل شعاع التحكم عن نظيره المبين في الشكل 9–7 ليصبح دائري الشكل . من الأنظمة التي تستخدم هذه الطريقة لتشكيل الأشعة الرادار الثانوي ونظام التعارف Lira-VMk المدمج في رادار الاستطلاع العسكري ثلاثي الأبعاد 1L117 .

أسئلة وتمارين

1– اشرح بالرسم نظرية عمل الرادار الثانوي .

2– اذكر صيغ الاستفسار المستخدمة مع توضيح شكل إشارة كل منها .

3– وضّح كيفية عمل نظام إلغاء الإشعاع الجانبي .

4– وضّح الطريقة المتبعة لحساب كل من مدى واتجاه الهدف في أنظمة الرادار الثانوي القياسي.

5- اشرح تركيب إطار إشارة الإجابة مع ذكر الغرض من توزيع أرقام المجموعات العددية .

6- رادار ثانوي يستخدم دمج الصيغتين A ، C رد عليه هدف هويته 2000 وارتفاعه البارومتري 8000 ft . ارسم شكل إشارة الإجابة واكتب مضمون الإجابة لكل استفسار باستخدام النظام الثماني .

7- اذكر الشفرات الخاصة المحجوزة للاستخدام في الحالات الطارئة .

8- بنفس الطريقة التي اتُّبعت لإيجاد معادلة المدى الأقصى للرادار الأولي ، أوجد معادلة المدى للرادار الثانوي .

9- رادار استطلاع ثانوي قدرته القصوى 1kW استفسر هدفاً يحمل مجيباً حساسيته -90dBm ويستخدم هوائياً مساحة منفذه $0.15\ m^2$ أوجد أقصى مدى ممكن لذلك الهدف إذا كان كسب هوائي الرادار 30dB .

المـراجع

1. Skolnik M.I., "Introduction to Radar Systems", McGraw-Hill, Inc., New York, 2nd Edition, 1980.

2. Skolnik M.I., "Radar Handbook", McGraw-Hill Inc., New York, 2nd Edition, 1990.

3. Brookner E., "Radar Technology", Artech House, Inc., Massachusetts, 1977.

4. Nathanson F.E., "Radar Design Principles", McGraw-Hill, Inc., New York, 2nd Edition, 1991.

5. Cole H.W., "Understanding Radar", BlackWell Scientific Publications, Oxford, 2nd Edition, 1992.

6. Ewell G.W., "Radar Transmitters", McGraw-Hill, Inc., New York, 1981.

7. Daffalla M.M., "Automation of Manually Operated Search Radar", MSc Thesis, University of Khartoum, 1998.

8. Marconi College, "Appreciations of Radar", Marconi GEC, Chelmsford, 1996.

9. Lira Bureau, Surveillance Radar 1L117 Documentation, Lemz Company, Moscow.

10. Meyer D.P., "Radar Target Detection", Academic Press, New York, 1973.

11. Crispin J.W., "Methods of Radar Cross-Section Analysis", Academic Press, 1968.

12. Ruck G.T., " Radar Cross-Section Handbook", Plenum Press, New York, 1970.

13. Barton D.K., "The Radar Equation", Artech House, Dedham, Masschutes, 1974.

14. Rabiner L.R., "Digital Signal Processing", IEEE Press, New York, 1972.

15. Spangenberg K.R., "Vacuum Tubes", McGraw-Hill, Inc., New York, 1948.

16. Parker W.N., "Gas Tubes Protect High-Power Transmitters", Electronics, 1956.

17. Gerard W.A., "Frequency-Agile Coaxial Magnetrons", Microwave J., 1973.

18. Eaves and Reedy, "Principles of Modern Radar", Van Nostrand Reinhold, 1987.

19. Toomay J.C., "Principles of Radar", SciTech, PHI, 1998.

20. Peyton Z. and Peebles, Jr., "Radar Principles", John Wiley, 2004.

21. Kraus and Fleisch, "Electromagnetics with Applications", McGraw-Hill, 1999.

22. Deitel and Deitel, "C++ How to Program", Prentice Hall, 2nd Edition, 1998.

23. Bhatta S., "Antenna and Wave Propagation", Shiva Book, VTU, 2003.

24. Silver S., "Microwave Antenna Theory and Design", McGraw-Hill, 1949.

25. Kraus J.D., "Antennas", McGraw-Hill, New York, 1950.

26. Van Voorhis S.N., "Microwave Receivers", McGraw-Hill, 1948.

27. Blackman S., "Multiple-Target Tracking with Radar Applications", Artech, 1986.

28. ICAO Circular Reference, "SSR Mode S Advisory Circular",174-AN/110, 1983.

29. Cole H.W., "The Future of SSR", ICAO Bulletin, 1980.

30. Barton D.K., "Modern Radar System Analysis", Artech House, Norwood, 1988.

31. Carey T.J., "Low Noise Synthesizer Design", HP Journal, Vol 38, 1987.

32. Woodward P.M., "Probability and Information Theory, with Applications to Radar", Pergamon Press Ltd., London, 1953.